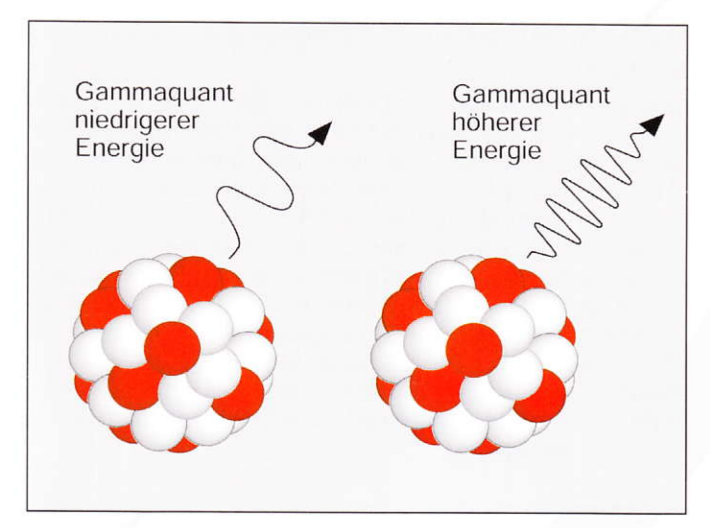


Abb. 3.7: Wellenlänge oder Frequenz eines Quants bestimmen eine Energie

Radionuklid	Umwandlungs-art	Energie der häufigsten Gammaquanten in der Reihenfolge abnehmender Häufigkeit (in MeV)
Be-7	K-Einfang	0,478
N-16	Beta-Minus	6,129; 7,115; ....
Na-22	Beta-Plus	1,275
U-235	Alpha	0,186; ....

Tab. 3-4: Gammaenergie einiger Radionuklide

Strahlenart	Frequenz in s^{-1}	Wellenlänge in m	Energie in eV	Energie in J
Niederfrequenz	$3 \cdot 10^{0}$	10^{8}	$1,24 \cdot 10^{-14}$	$1,99 \cdot 10^{-33}$
	$3 \cdot 10^{1}$	10^{7}	$1,24 \cdot 10^{-13}$	$1,99 \cdot 10^{-32}$
	$3 \cdot 10^{2}$	10^{6}	$1,24 \cdot 10^{-12}$	$1,99 \cdot 10^{-31}$
	$3 \cdot 10^{3}$	10^{5}	$1,24 \cdot 10^{-11}$	$1,99 \cdot 10^{-30}$
Hochfrequenz (LW, MW, KW, UKW)	$3 \cdot 10^{4}$	10^{4}	$1,24 \cdot 10^{-10}$	$1,99 \cdot 10^{-29}$
	$3 \cdot 10^{5}$	10^{3}	$1,24 \cdot 10^{-9}$	$1,99 \cdot 10^{-28}$
	$3 \cdot 10^{6}$	10^{2}	$1,24 \cdot 10^{-8}$	$1,99 \cdot 10^{-27}$
	$3 \cdot 10^{7}$	10	$1,24 \cdot 10^{-7}$	$1,99 \cdot 10^{-26}$
	$3 \cdot 10^{8}$	1	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-25}$
Höchstfrequenz (Radar)	$3 \cdot 10^{9}$	10^{-1}	$1,24 \cdot 10^{-5}$	$1,99 \cdot 10^{-24}$
	$3 \cdot 10^{10}$	10^{-2}	$1,24 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-23}$
	$3 \cdot 10^{11}$	10^{-3}	$1,24 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \cdot 10^{-22}$
IR	$3 \cdot 10^{12}$	10^{-4}	$1,24 \cdot 10^{-2}$	$1,99 \cdot 10^{-21}$
	$3 \cdot 10^{13}$	10^{-5}	$1,24 \cdot 10^{-1}$	$1,99 \cdot 10^{-20}$
Licht	$3 \cdot 10^{14}$	10^{-6}	$1,24 \cdot 10^{0}$	$1,99 \cdot 10^{-19}$
UV	$3 \cdot 10^{15}$	10^{-7}	$1,24 \cdot 10^{1}$	$1,99 \cdot 10^{-18}$
Röntgenstrahlen	$3 \cdot 10^{16}$	10^{-8}	$1,24 \cdot 10^{2}$	$1,99 \cdot 10^{-17}$
	$3 \cdot 10^{17}$	10^{-9}	$1,24 \cdot 10^{3}$	$1,99 \cdot 10^{-16}$
γ-Strahlen; energiereiche Strahlung	$3 \cdot 10^{18}$	10^{-10}	$1,24 \cdot 10^{4}$	$1,99 \cdot 10^{-15}$
	$3 \cdot 10^{19}$	10^{-11}	$1,24 \cdot 10^{5}$	$1,99 \cdot 10^{-14}$
Quanten der Höhenstrahlung	$3 \cdot 10^{20}$	10^{-12}	$1,24 \cdot 10^{6}$	$1,99 \cdot 10^{-13}$
	$3 \cdot 10^{21}$	10^{-13}	$1,24 \cdot 10^{7}$	$1,99 \cdot 10^{-12}$
	$3 \cdot 10^{22}$	10^{-14}	$1,24 \cdot 10^{8}$	$1,99 \cdot 10^{-11}$
	$3 \cdot 10^{23}$	10^{-15}	$1,24 \cdot 10^{9}$	$1,99 \cdot 10^{-10}$
	$3 \cdot 10^{24}$	10^{-16}	$1,24 \cdot 10^{10}$	$1,99 \cdot 10^{-9}$

Abb. 3.8: Beziehung zwischen Frequenz, Wellenlänge und Energie elektromagnetischer Wellen

3.7 Erzeugung von Wärme durch radioaktive Stoffe

Alpha- und Betateilchen, die aus radioaktiven Atomkernen ausgeschleudert werden, besitzen aufgrund ihrer Masse und ihrer Geschwindigkeit Bewegungsenergie. Je größer Masse und Geschwindigkeit sind, desto größer ist die Bewegungsenergie. Da der radioaktive Atomkern beim Ausschleudern eines Teilchens einen Rückstoß erfährt, besitzt er ebenfalls Bewegungsenergie (Abb. 3.9).

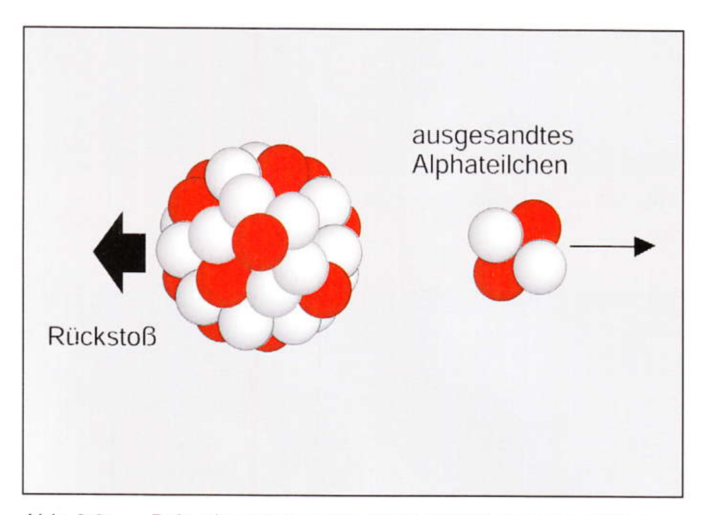


Abb. 3.9: Beim Ausschleudern eines Alphateilchens erfährt der Kern einen Rückstoß

Ausgesandte Teilchen und Rückstoßkerne stoßen mit den in unmittelbarer Umgebung vorhandenen Atomen zusammen und versetzen diese in heftigere Bewegungen. Das macht sich als Temperaturerhöhung bemerkbar. Eine radioaktive Substanz hat also immer eine höhere Temperatur als die in der Nähe befindlichen nichtradioaktiven Substanzen.

1 g Radium einschließlich aller radioaktiver Folgeprodukte gibt in jeder Stunde etwa 711,8 J an die Umgebung ab. Dabei wird der bei weitem überwiegende Anteil der Energie von den Alphateilchen abgegeben. Dieser je Stunde abgegebene Energiebetrag würde ausreichen, die Temperatur von etwa 1,7 g Wasser von 0 °C auf 100 °C zu erhöhen.

Bei größeren Massen radioaktiver Stoffe, deren spezifische Aktivität sehr hoch ist, kann die Erwärmung so stark sein, dass sich der Stoff bis zum Glühen erhitzt. Die Abb. 3.10 (Quelle: Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA) zeigt eine glühende Säule aus Curiumoxid. Das Radionuklid ist Cm-242, das Alphateilchen mit recht hohen Anfangsenergien von 6,113 MeV und 6,069 MeV aussendet. Auch die bei Kernkraftwerken in den Brennstäben anfallenden radioaktiven Spaltprodukte erwärmen die Brennstäbe so stark, dass diese nach Entnahme aus dem Reaktor zur ständigen Kühlung in einem Wasserbecken aufbewahrt werden müssen. Die Wärmeproduktion klingt im Laufe der Zeit ab.

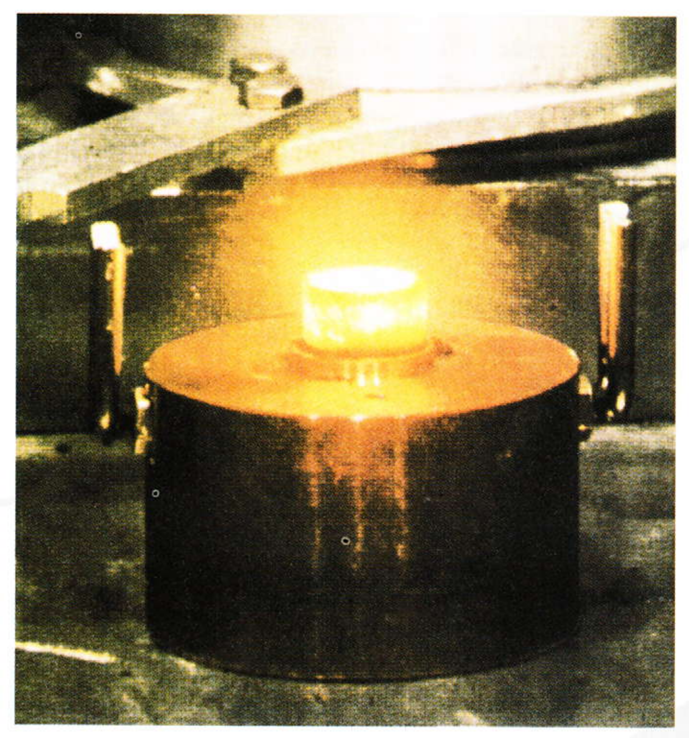


Abb. 3.10: „Selbsterhitzung" eines Zylinders aus Curiumoxid. Die Wärmeleistung dieser Probe beträgt etwa 300 W.

4 Kernspaltung und Kettenreaktion

4.1 Entdeckung der Kernspaltung

Im Jahr 1932 gelang dem Engländer Chadwick, die sehr durchdringenden Strahlen richtig zu deuten, die beim Beschuss von Beryllium mit Alphateilchen entstehen.

$$^{4}_{2}He + ^{9}_{4}Be \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n + \gamma$$

Die dabei auftretenden Teilchen nannte er wegen ihres elektrisch neutralen Charakters Neutronen.

Nachdem das Proton bereits 1919 durch Rutherford entdeckt worden war, konnte man nun endlich den Aufbau der Atomkerne aus Protonen und Neutronen erklären.

Gleichzeitig hatte man ein Teilchen zur Verfügung, das sich relativ leicht in andere Atomkerne einbauen ließ, da ein Neutron von den positiven Ladungen der Protonen nicht abgestoßen wird, weil es ungeladen ist. Die freien Neutronen wurden zunächst zur Erzeugung künstlicher Isotope benutzt.

Beispiel einer Isotopenerzeugung mit stabilem Endkern:

$$^{1}_{0}n + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{2}_{1}H + \gamma$$

Beispiel einer Isotopenerzeugung mit radioaktivem Endkern:

$$^{19}_{9}F + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{20}_{9}F \quad \text{(Aktivierung)}$$

$$^{20}_{9}F \rightarrow ^{20}_{10}Ne + ^{0}_{-1}e \quad \text{(Zerfall)}$$

$T_{1/2} =$ 11,0 s

Beim Beschuss von Uran und Thorium mit Neutronen wurde 1934 erstmals die Vermutung geäußert, es könnten Elemente mit einer Kernladungszahl über 92 entstehen (Transurane).

Gleichzeitig tauchte im selben Jahr die Vermutung auf, dass bei der Beschießung schwerer Kerne mit Neutronen die Kerne in mehrere Bruchstücke zerfallen könnten. Diese Annahme wurde aber nicht weiter überprüft.

In Berlin waren die Chemiker Otto Hahn (Abb. 4.1) und Fritz Strassmann (bis 1938 zusammen mit der Physikerin Lise Meitner) damit beschäftigt, die geringen Mengen der erzeugten Isotope zu identifizieren. Chemische Untersuchungen legten die Annahme nahe, dass beim Beschuss von Uran mit Neutronen Radiumisotope entstanden seien. In einem Aufsatz, den Otto Hahn und Fritz Strassmann im Dezember 1938 der Zeitschrift „Naturwissenschaften" zur Publikation eingereicht hatten und der im Januar 1939 erschien, heißt es: „Unsere Radium-Isotope haben die Eigenschaften des Bariums; als Chemiker müssten wir eigentlich sagen, bei den neuen Körpern handelt es sich nicht um Radium, sondern um Barium".

Durch Gedankenaustausch mit anderen Forschern, vor allem mit der nach Schweden emigrierten Lise Meitner, festigte sich die Überzeugung, dass beim Beschuss von Uran mit Neutronen tatsächlich radioaktives Barium entstanden war. Das konnte dann aber nichts anderes bedeuten, als dass Urankerne gespalten worden waren. Eine zweite Arbeit von Hahn und Strassmann, die im Januar 1939 zur Veröffentlichung eingereicht worden war, trägt bereits den Titel: „Nachweis der Entstehung aktiver Bariumisotope aus Uran und Thorium durch Neutronenbestrahlung; Nachweis weiterer aktiver Bruchstücke bei der Kernspaltung".

In diesem Aufsatz wird also erstmals das Wort Kernspaltung veröffentlicht, das von Lise Meitner und ihrem Mitarbeiter Max Frisch geprägt worden war. Es wird darin gleichzeitig aufgezeigt, dass als Spaltprodukte nicht nur Barium, sondern auch radioaktive Isotope des Strontiums und Yttriums entstanden waren.

4.2 Kernspaltung und Spaltprodukte

Es ist nachgewiesen worden, dass grundsätzlich alle Atomkerne gespalten werden können. Bei bestimmten Uran- und Plutoniumisotopen ist aber die Spaltung mit Hilfe von Neutronen besonders leicht durchzuführen. Außerdem wird bei der Spaltung dieser Kerne mehr Energie frei als dafür aufgewendet werden muss (exotherme Reaktion). In der Natur kommen drei Uranisotope vor, U-234, U-235 und U-238. Sie sind Alphastrahler mit unterschiedlichen Halbwertszeiten (Tab. 4-1).



Abb. 4.1: Nobelpreisträger Otto Hahn (1879 - 1968)

Isotop	Halbwertszeit	Isotopenhäufigkeit
U-234	$2{,}446 \cdot 10^5$ a	0,005 %
U-235	$7{,}038 \cdot 10^8$ a	0,720 %
U-238	$4{,}468 \cdot 10^9$ a	99,275 %

Tab. 4-1: Die natürlichen Uranisotope

Alle drei Uranisotope haben zusätzlich die Eigenschaft (wie die meisten Transurane auch), sich spontan zu spalten. Die Spontanspaltung ergibt sich aus der Tatsache, dass bei schweren Atomkernen die Abstoßung zwischen den Protonen etwa so groß ist wie die zusammenhaltenden Kernkräfte. Die Stabilität solcher Kerne ist dadurch sehr geschwächt. Da Spontanspaltungen bei Uran sehr selten vorkommen, spielen sie für die Kerntechnik praktisch keine Rolle. Es werden deshalb hier nur Kernspaltungen beschrieben, die durch Neutronenbeschuss künstlich ausgelöst werden. Dabei verhalten sich die Uranisotope gegenüber Neutronenbeschuss unterschiedlich. Bei Uran-238 wird eine Spaltung nur selten erreicht und dann nur bei hoher Energie (Geschwindigkeit) der Neutronen. Die Kerne des Uran-235 lassen sich dagegen sehr viel leichter sowohl durch schnelle als auch durch thermische (langsame) Neutronen spalten. Mit langsamen Neutronen gelingt die Spaltung aber besonders leicht. Uran-234 spielt für Kernspaltungen wegen seines geringen Vorkommens in der Natur praktisch keine Rolle.

Bei den in der Bundesrepublik Deutschland betriebenen Kernkraftwerken werden Kerne des Uran-235 (und z. T. auch des Plutonium-239) gespalten. Dafür braucht das Uran nicht als Element vorzuliegen. Es ist auch in Form chemischer Verbindungen (z. B. als UO_2) spaltbar. Eine Kernspaltung lässt sich durch eine Kernreaktionsgleichung beschreiben.

Beispiel:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{89}_{36}Kr + ^{144}_{56}Ba + 3\,^{1}_{0}n + \gamma$$

Trifft ein langsames (thermisches) Neutron auf einen Atomkern des Uran-235, wird es in den Kern aufgenommen. Es entsteht ein hochangeregter Zwischenkern des Isotops Uran-236. Seine Lebensdauer beträgt nur etwa 10^{-14} s (Abb. 4.2). Der neue Kern versucht, seine Anregungsenergie abzugeben. In etwa sechs von sieben Fällen tritt eine Spaltung ein, in einem Fall geht der Atomkern durch Aussenden eines Gammaquants in das langlebige Isotop Uran-236 über (Alphastrahler, $T_{1/2} = 2{,}342 \cdot 10^7$ a).

Die Spaltung kann man sich im Modell so vorstellen, dass nach dem Einfang des Neutrons der Urankern zu schwingen beginnt, sich ellipsenförmig verformt, hantelförmig einschnürt und letztlich in zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie in zwei bis drei Neutronen zerfällt. An der Stelle der Einschnürung berühren sich nur wenige Nukleonen, so dass nur noch geringe Kernkräfte für den Zusammenhalt zur Verfügung stehen. Die abstoßenden elektrischen Kräfte zwischen den Protonen werden zwar mit zunehmender Entfernung etwas kleiner, sie bleiben aber insgesamt bestehen. Von einer bestimmten Einschnürung ab überwiegen sie schließlich und treiben die beiden Teile des Kerns auseinander. Außerdem überwiegt die Tendenz der Kernteilchen, sich zu kleineren Kernen zusammenzuballen, weil das energetisch günstiger ist.

Die Spaltung eines Uran-235-Kernes kann verschiedene Trümmerkerne (Spaltprodukte) ergeben. Dabei muss die Summe der Kernladungszahlen der Spaltprodukte gleich der Kernladungszahl des Urans sein. Die Massenzahlen der Trümmerkerne und der frei gewordenen Neutronen betragen stets 236.

Die Massenzahlen der Spaltprodukte liegen etwa zwischen 70 und 160. Ein Maximum liegt bei der Massenzahl 95, ein zweites Maximum bei der Massenzahl 140. Die Massenzahlen liegen am häufigsten im Verhältnis 2:3 zueinander. Abb. 4.3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der bei der Spaltung von Uran-235 entstehenden Spaltprodukte. Man kennt heute etwa 200 verschiedene Spaltprodukte des Uran-235, die sich auf 35 verschiedene Elemente beziehen, von Zink (Kernladungszahl 30) bis zum Terbium (Kernladungszahl 65).

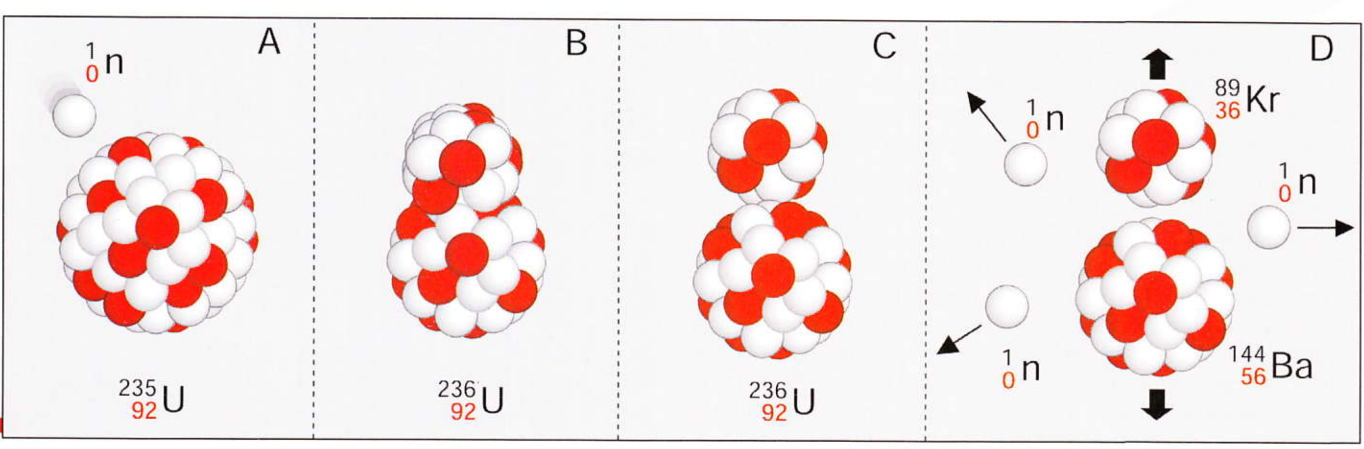


Abb. 4.2: Vier-Phasen-Modell zur Kernspaltung

Beispiele:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{147}_{57}La + ^{87}_{35}Br + 2\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{147}_{60}Nd + ^{86}_{32}Ge + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{89}_{36}Kr + ^{144}_{56}Ba + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{85}_{34}Se + ^{148}_{58}Ce + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{103}_{42}Mo + ^{131}_{56}Sn + 2\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{137}_{53}I + ^{96}_{39}Y + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{143}_{54}Xe + ^{90}_{38}Sr + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{137}_{55}Cs + ^{96}_{37}Rb + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{135}_{52}Te + ^{98}_{40}Zr + 3\,^{1}_{0}n$$

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U \rightarrow ^{153}_{51}Sb + ^{101}_{41}Nb + 2\,^{1}_{0}n$$

Aufgrund des Neutronenüberschusses sind die Spaltprodukte zum großen Teil radioaktiv. Sie wandeln sich unter Aussenden von Betastrahlen in stabile Kerne um. Dabei werden ganze Zerfallsreihen durchlaufen. Es ist aber auch Neutronenemission möglich.

Neben den Spaltprodukten entstehen durch Neutroneneinfang im Uran Plutonium und andere Aktiniden (Aktiniden ist eine Bezeichnung für die Elemente mit den Kernladungszahlen 89 (Actinium) bis 109). Die Tab. 4-2 gibt die Zusammensetzung von Kernbrennstoff vor und nach dem Reaktoreinsatz bei einem Abbrand von 33 000 MWd/t an. Ein Abbrand von 33 000 MWd/t bedeutet, dass der Kernbrennstoff so lange im Reaktor eingesetzt war, dass pro Tonne Kernbrennstoff eine Energie von 33 000 MWd gewonnen wurden (1 MWd = 24 000 kWh).

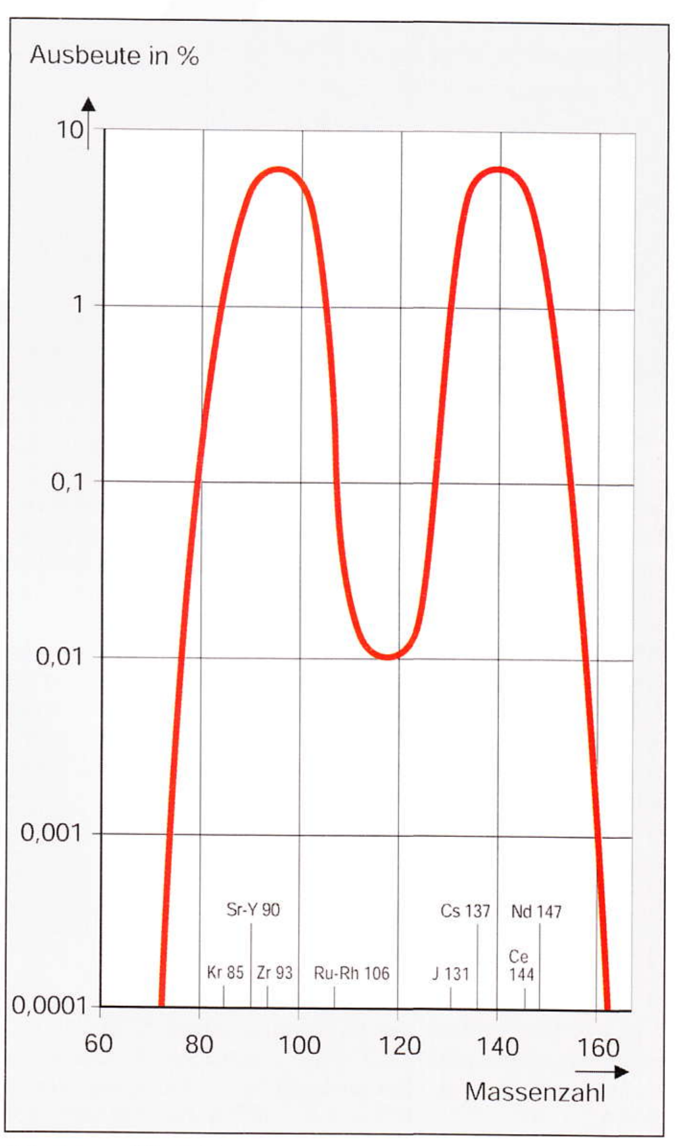


Abb. 4.3: Häufigkeitsverteilung der bei der Spaltung von Uran-235 entstehenden Spaltprodukte

Natururan	99,3 % U-238 0,7 % U-235
Kernbrennstoff vor dem Reaktoreinsatz	96,5 % U-238 3,5 % U-235
Kernbrennstoff nach dem Reaktoreinsatz (Abbrand 33 000 MWd/t)	ca. 95,0 % U-238 ca. 0,8 % U-235 ca. 3,2 % Spaltprodukte ca. 0,9 % Pu ca. 0,1 % übrige Aktiniden

Tab. 4-2: Radionuklide im Kernbrennstoff vor und nach dem Einsatz im Reaktor

4.3 Energiebilanz bei der Kernspaltung

Im Urankern sind die Nukleonen (Protonen und Neutronen) mit einer mittleren Energie von etwa 7,6 MeV pro Nukleon gebunden. In den kleineren Spaltproduktkernen mit Massenzahlen zwischen 80 und 150 beträgt die mittlere Bindungsenergie je Nukleon aber etwa 8,5 MeV. Die Differenz von 0,9 MeV je Nukleon wird bei der Kernspaltung freigesetzt. Da der Urankern 235 Nukleonen besitzt, ergibt sich bei jeder Spaltung ein Energiebetrag von 235 · 0,9 MeV, also rund 210 MeV. Er setzt sich aus folgenden Teilbeträgen zusammen (Tab. 4-3):

Bewegungsenergie der Spaltprodukte	175 MeV
Bewegungsenergie der Neutronen	5 MeV
Bei der Kernspaltung auftretende Gammastrahlung	7 MeV
Energie aus dem Betazerfall der Spaltprodukte	7 MeV
Energie der Gammaquanten der Spaltprodukte	6 MeV
Energie der Neutrinos	10 MeV
Summe	210 MeV

Tab. 4-3: Energiefreisetzung bei der Kernspaltung

Von dem Energiebetrag 210 MeV können in einem Kernreaktor nur etwa 190 MeV = $1{,}9 \cdot 10^8$ eV genutzt werden, das sind rund 90 %, da die Energie der Gammastrahlen nur z. T. im Innern des Reaktors absorbiert und die Zerfallsenergie der Spaltprodukte z. T. erst im radioaktiven Abfall außerhalb des Reaktors frei wird. Die Energie der Neutrinos kann praktisch gar nicht genutzt werden, da sie mit Materie kaum wechselwirken. Die pro Kernspaltung nutzbare Energie von $1{,}9 \cdot 10^8$ eV ist ein sehr kleiner Betrag. Um 1 J Wärme zu erzeugen, müssen rund 33 Mrd. Urankerne gespalten werden:

$$1\,\text{J} = 6{,}242 \cdot 10^{18}\,\text{eV}$$

$$N = \frac{6{,}242 \cdot 10^{18}\,\text{eV}}{1{,}9 \cdot 10^{8}\,\text{eV}} \approx 3{,}3 \cdot 10^{10} = 33\,\text{Mrd.}$$

Um bei 1 kg Wasser die Temperatur von 0 °C auf 100 °C zu erhöhen, sind $E_{th} = 4{,}2 \cdot 10^5$ J erforderlich. Um diese Wärmemenge aus Kernenergie zu erzeugen, wären $N = 4{,}2 \cdot 10^5 \cdot 3{,}3 \cdot 10^{10} \approx 1{,}4 \cdot 10^{16}$ Kerne des Uran-235 zu spalten. Das entspricht einer Masse an reinem Uran-235 von etwa $m = 5{,}5$ µg.

Wie viel Urankerne gespalten werden müssten, wenn der Jahresbedarf an elektrischer Energie einer europäischen Stadt mit 1,5 Mio. Einwohnern vollständig aus Kernenergie gedeckt werden sollte, zeigt folgende Rechnung:

- Angenommener Jahresbedarf an elektrischer Energie:

  $E_{el} = 10^{10}\,\text{kWh} = 3{,}6 \cdot 10^{16}\,\text{Ws}$

- Da der Wirkungsgrad von Kernkraftwerken etwa 0,34 ist, muss im Kraftwerk zunächst rund dreimal soviel Wärmeenergie erzeugt werden:

  $E_{th} = 3 \cdot 3{,}6 \cdot 10^{16}\,\text{Ws} = 10{,}8 \cdot 10^{16}\,\text{Ws} = 10{,}8 \cdot 10^{16}\,\text{J}$

- Umrechnung der Einheit J in die Einheit eV ($1\,\text{J} = 6{,}242 \cdot 10^{18}\,\text{eV}$):

  $E_{th} =$
  $10{,}8 \cdot 10^{16}\,\text{J} = 6{,}242 \cdot 10^{18}\,\text{eV} \cdot 10{,}8 \cdot 10^{16} \approx 6{,}74 \cdot 10^{35}\,\text{eV}$

Für den gesamten Energiebetrag von $6{,}74 \cdot 10^{35}$ eV ergibt sich eine sehr große Anzahl N von Kernspaltungen:

$$N = \frac{6{,}74 \cdot 10^{35}\,\text{eV}}{1{,}9 \cdot 10^{8}\,\text{eV}} \approx 3{,}6 \cdot 10^{27}$$

Es bedeutet also, dass in einem Kernkraftwerk $N = 3{,}6 \cdot 10^{27}$ Urankerne gespalten werden müssen, um eine Wärmeenergie von $E_{th} = 10{,}8 \cdot 10^{16}$ J zu erhalten, die dann zu 34 % in $E_{el} = 3{,}6 \cdot 10^{16}\,\text{Ws} = 10 \cdot 10^9$ kWh elektrische Energie umgewandelt werden.

- Die $N = 3{,}6 \cdot 10^{27}$ gespaltenen Atomkerne haben vor der Spaltung eine bestimmte Masse. Sie kann über die Loschmidtsche Zahl berechnet werden.

  $6{,}023 \cdot 10^{23}$ U-235-Atome haben eine Masse von 235 g. $3{,}6 \cdot 10^{27}$ Uranatome haben eine Masse m:

  $$m = \frac{3{,}6 \cdot 10^{27} \cdot 235\,\text{g}}{6{,}023 \cdot 10^{23}} = 1{,}39 \cdot 10^6\,\text{g} = 1{,}39\,\text{t}$$

  Da die Dichte von Uran $\rho = 19\,\text{g/cm}^3$ beträgt, hätten 1,39 t Uran ein Volumen von $V = 73\,158\,\text{cm}^3$. Das entspräche einem Würfel mit der Kantenlänge von etwas weniger als 0,42 m.

- Würde man dieselbe Menge an Wärmeenergie $E_{th} = 10{,}8 \cdot 10^{16}$ J durch Verfeuern von Steinkohle erzeugen wollen, wäre eine Masse von $m = 3{,}4 \cdot 10^6$ t erforderlich (das 2,5 Millionenfache des Urans). Der Heizwert von Steinkohle beträgt $E_h = 31{,}8 \cdot 10^6\,\text{J/kg} \approx 32 \cdot 10^6\,\text{J/kg}$. Daraus errechnet sich:

  $$m = \frac{10{,}8 \cdot 10^{16}\,\text{J} \cdot \text{kg}}{32 \cdot 10^6\,\text{J}} \approx 3{,}4 \cdot 10^9\,\text{kg} = 3{,}4 \cdot 10^6\,\text{t}$$

  Da die Schüttdichte von Steinkohle $\rho \approx 1\,\text{kg/dm}^3$ beträgt, hätte der Kohleberg ein Volumen von $V = 3{,}4 \cdot 10^9\,\text{dm}^3 = 3{,}4 \cdot 10^6\,\text{m}^3$. Das entspräche einem Würfel mit der Kantenlänge von etwas mehr als 150 m.

4.4 Kettenreaktion im Uran-235

Hahn und Strassmann äußerten bereits in ihren beiden ersten Aufsätzen über die Kernspaltung die Vermutung, dass neben den beiden Spaltprodukten noch einige Neutronen entstehen müssten. Dies wurde von dem französischen Forscher Joliot im März 1939 experimentell bestätigt. Damit hatte man die Möglichkeit erkannt, einen sich selbst erhaltenden Kernspaltungsprozess ablaufen zu lassen. Unter geeigneten Bedingungen können nämlich die freigesetzten Neutronen sofort weitere Uranatome spalten, so dass ein lawinenartig ablaufender Spaltprozess entsteht. Er wird allgemein als Kettenreaktion bezeichnet.

Abb. 4.4 zeigt den Beginn einer solchen Kettenreaktion im Modell. Geht man davon aus, dass nach jeder Spaltung zwei freie Neutronen zur Verfügung stehen (tatsächlich sind es im Mittel 2,3), sind es in den weiteren Schritten 4, 8, 16, 32, 64, 128 usw. Wenn genügend Urankerne vorhanden sind, keine Neutronen nach außen verloren gehen oder von Fremdatomen eingefangen werden, verdoppelt

sich die Anzahl der Kernspaltungen von Neutronengeneration zu Neutronengeneration, und der gesamte Vorgang läuft lawinenartig ab. Dabei werden ungeheure Mengen an Energie in kürzester Zeit frei.

Bei reinem Uran-235 liegt die Lebensdauer einer Neutronengeneration im Bereich von milliardstel Sekunden (10^{-9} s). 100 Neutronengenerationen wären dann – wenn jedes Neutron eine weitere Kernspaltung auslöst – nach $t = 100 \cdot 10^{-9}$ s $= 10^{-7}$ s $= 0{,}1$ µs entstanden. Geht man davon aus, dass pro Spaltung zwei Neutronen freigesetzt werden, wären in der 100. Generationen $2^{100} \approx 10^{30}$ Neutronen entstanden. Das sind theoretisch mehr Neutronen, als zur Spaltung auch größerer Massen Uran benötigt würden (0,235 kg U-235 enthalten $6{,}023 \cdot 10^{23}$ Atome, 1 t U-235 besteht aus etwas $2{,}56 \cdot 10^{27}$ Atomen).

Nimmt man an, dass reines Uran-235 in Würfelform vorliegt und dass keine neutronenabsorbierenden Fremdatome vorhanden sind, ist für die Auslösung einer Kettenreaktion entscheidend, dass möglichst wenige Neutronen entweichen. Man erreicht dies dadurch, dass eine genügend große, möglichst kugelförmige Masse gewählt wird. Das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen dieser Masse ist dann klein. Diese Mindestmasse, in der eine Kettenreaktion in Gang gesetzt werden kann, wird kritische Masse genannt. Sie beträgt bei Uran-235 etwa 50 kg, wenn das Uran als festes Metall in Kugelform vorliegt und die Neutronen unmoderiert und unreflektiert sind. Der Radius einer Kugel liegt dann bei etwa 8,5 cm. Die kritische Masse lässt sich verkleinern, wenn der spaltbare Stoff von einem Reflektor (z. B. Graphit, Beryllium, Schweres Wasser) umgeben ist, der einen Teil der austretenden Neutronen wieder in das Uran zurücklenkt und wenn die Neutronen moderiert werden (Tab. 4-4).

Da in der natürlichen Umgebungsstrahlung stets freie Neutronen vorhanden sind, würde in einer kritischen Masse immer sofort eine Kettenreaktion ausgelöst.

Wenn man die Masse der Kernteilchen des Uran-235 und des primären Neutrons mit der Summe der Massen der Spaltprodukte und der sekundären Neutronen vergleicht, so ist nach der Kernspaltung ein geringer Massenverlust festzustellen. Dieser Verlust entspricht der bei der Spaltung frei werdenden Energie. Nach einem von Einstein 1905 formulierten Gesetz sind Masse und Energie einander äquivalent. Es sind zwei Formen eines und desselben

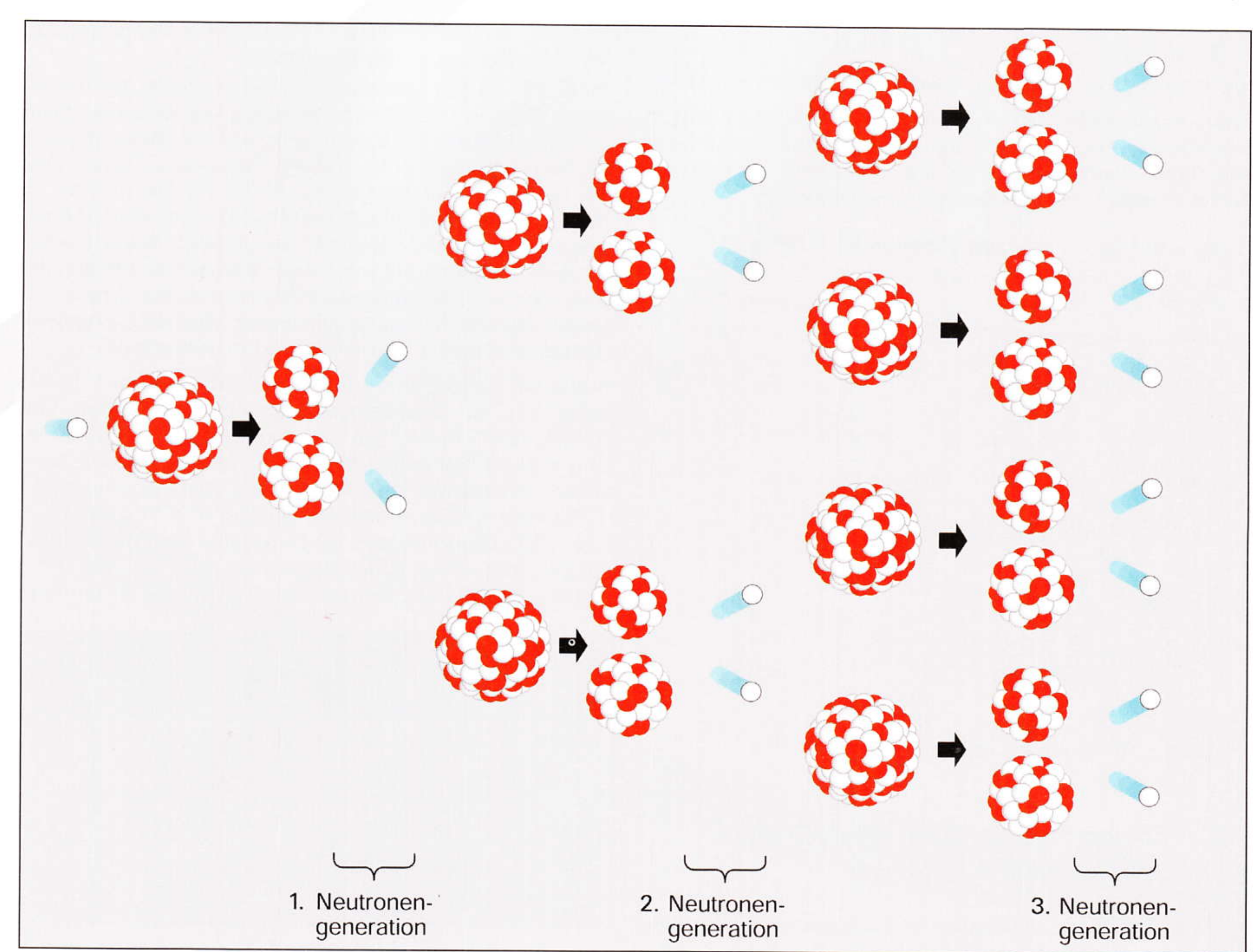


Abb. 4.4: Kettenreaktion im Uran-235

Radionuklid	kleinste kritische Masse bei Kugelform			
	für Metall (schnelle, unmoderierte Systeme)		für wässrige Lösung bei optimaler Moderation	
	unreflektiert	durch Wasser reflektiert	unreflektiert	durch Wasser reflektiert
U-233	16,5 kg	7,3 kg	1,2 kg	0,59 kg
U-235	49,0 kg	22,8 kg	1,5 kg	0,82 kg
Pu-239	10,0 kg	5,42 kg	0,905 kg	0,53 kg
Pu-240	158,7 kg	148,4 kg		
Pu-241		6,0 kg		0,26 kg
Am-242				0,02 kg
Cf-251				0,01 kg

Tab. 4-4: Kritische Massen für einige Radionuklide

Phänomens. Masse lässt sich in Energie und Energie in Masse überführen. Das Gesetz lautet:

$$E = m \cdot c^2$$

(E: Energie, m: Masse, c: Vakuumlichtgeschwindigkeit)

Bei einer vollständigen Spaltung von 1 kg Uran-235 tritt ein Massenverlust von 1 g auf. Die Spaltprodukte und sekundären Neutronen haben nur noch eine Masse von 999 g. Dieses 1 g wird in Energie umgewandelt:

$$1\ \text{g} = 10^{-3}\ \text{kg} \qquad c \approx 300\,000\ \text{km/s} = 3 \cdot 10^8\ \text{m/s}$$

$$E = 10^{-3}\ \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8)^2\ \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$E = 9 \cdot 10^{13}\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Es gilt:

$$1\ \text{N} = \frac{1\ \text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \Rightarrow 1\ \text{kg} = \frac{1\ \text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}}$$

Daraus folgt:

$$E = 9 \cdot 10^{13}\ \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^2}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

$$E = 9 \cdot 10^{13}\ \text{Nm} = 9 \cdot 10^{13}\ \text{J}$$

4.5 Erzeugung von Plutonium-239 und von Uran-233

Uran-235 wird am effektivsten von langsamen Neutronen gespalten. Neutronen mittlerer sowie höherer Geschwindigkeit können aber auch von Uran-238 aufgenommen werden. Dabei tritt keine Kernspaltung, sondern eine Umwandlung in das Uran-Isotop U-239 ein. Es wandelt sich in zwei Schritten unter Aussenden von Betateilchen zu Pu-239 um. Pu-239 ist ein Alphastrahler und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 24 110 Jahren in Uran-235 (Abb. 4.5). Pu-239 wird durch langsame, günstiger aber durch schnelle Neutronen gespalten und ist deshalb für Kernspaltung geeignet.

$$^{238}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{N} \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U}$$

$$^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{93}\text{Np} + {}^{0}_{-1}\text{e}$$

$T_{1/2}$ 23,5 min

$$^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^{0}_{-1}\text{e}$$

$T_{1/2}$ 2,355 d

Durch Aufnahme weiterer Neutronen bilden sich aus Pu-239 weitere Plutonium-Isotope: Pu-240, Pu-241, Pu-242 und Pu-243 (Tab. 4-5). Je länger die Uran-Brennelemente im Reaktor verbleiben, desto mehr Plutonium bildet sich. Bei der üblichen Einsatzdauer der Brennelemente sind das etwa 10 g Plutonium pro 1 kg Uran.

Plutonium ist das einzige künstliche Element, das in größeren Mengen erzeugt wird. In einem Leichtwasserreaktor mit einer elektrischen Leistung von 1 300 MW entstehen jährlich insgesamt etwa 313 kg Plutonium. Davon sind 176 kg Pu-239, 74 kg Pu-240, 46 kg Pu-241 und 17 kg Pu-242. Die Isotope Pu-239 und Pu-241 sind durch thermische Neutronen leicht spaltbar. Das nicht im Reaktor selbst gespaltene Plutonium kann bei der Wiederaufarbeitung der Brennelemente isoliert und in Brennelementen erneut eingesetzt werden. In den so genannten Mischoxid-Brennelementen wird neben UO_2 bis zu 5 % PuO_2 verwendet.

Plutonium kommt in extrem kleinen Mengen auch in der Natur vor. In Uranerzlagern findet man Spuren von Pu-239, das durch die Neutronen der Höhenstrahlung ständig neu gebildet wird. Es kann auch durch Neutronen erzeugt werden, die bei der Spontanspaltung von U-238 oder U-235 entstehen. Spuren von Pu-244 ($T_{1/2}$ = 8,26 · 10^7) stammen wahrscheinlich aus der Entstehungszeit der Erde. In 1 g natürlichem Uran sind 10^{-11} bis 10^{-12} g Plutonium enthalten. Es bedeutet, dass für die Gewinnung

Isotop	Halbwertszeit	Bereitschaft für Spaltung durch thermische Neutronen in relativen Einheiten
Pu-239	$2{,}411 \cdot 10^4$ a	17 100
Pu-240	$6{,}55 \cdot 10^3$ a	1
Pu-241	14,4 a	22 950
Pu-242	$3{,}763 \cdot 10^5$ a	5
Pu-243	4,956 h	4 500

Tab. 4-5: Daten für verschiedene Pu-Isotope, der Wert von Plutonium-240 wurde gleich 1 gesetzt

von 1 mg natürlichem Plutonium 1 000 t natürliches Uran chemisch aufgearbeitet werden müssten.

Das in der Natur vorkommende Element Thorium-232 kann durch einen ähnlichen Umwandlungsprozess in Uran-233 verwandelt werden, das durch langsame Neutronen spaltbar ist. Ein Thoriumkern absorbiert ein Neutron, so dass das Thoriumisotop-233 entsteht ($T_{1/2}$ = 22,3 min). Dieses geht unter Aussenden eines Betateilchens in das Element Protaktinium-233 über ($T_{1/2}$ = 27,0 d). Durch eine weitere Beta-Emission wandelt sich das Protaktinium-233 in das Uran-233 um ($T_{1/2}$ = 159 200 a) (Abb. 4.6). Uran-233 ist ein Alphastrahler und zerfällt mit einer Halbwertszeit von 1,592 105 Jahren in Thorium-229.

$$^{232}_{90}\mathrm{Th} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{233}_{90}\mathrm{Th}$$

$$\underset{T_{1/2} = 22{,}3\ \mathrm{min}}{^{233}_{90}\mathrm{Th}} \rightarrow {}^{233}_{91}\mathrm{Pa} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

$$\underset{T_{1/2} = 27{,}0\ \mathrm{d}}{^{233}_{91}\mathrm{Pa}} \rightarrow {}^{233}_{92}\mathrm{U} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}$$

Die gezielte Gewinnung von Plutonium-239 und Uran-233 bezeichnet man allgemein als „breeding" (Brüten). Auf diesem Vorgang beruht die Funktion eines sog. Brutreaktors.

Abb. 4.5: Entstehung von Pu-239 aus U-238

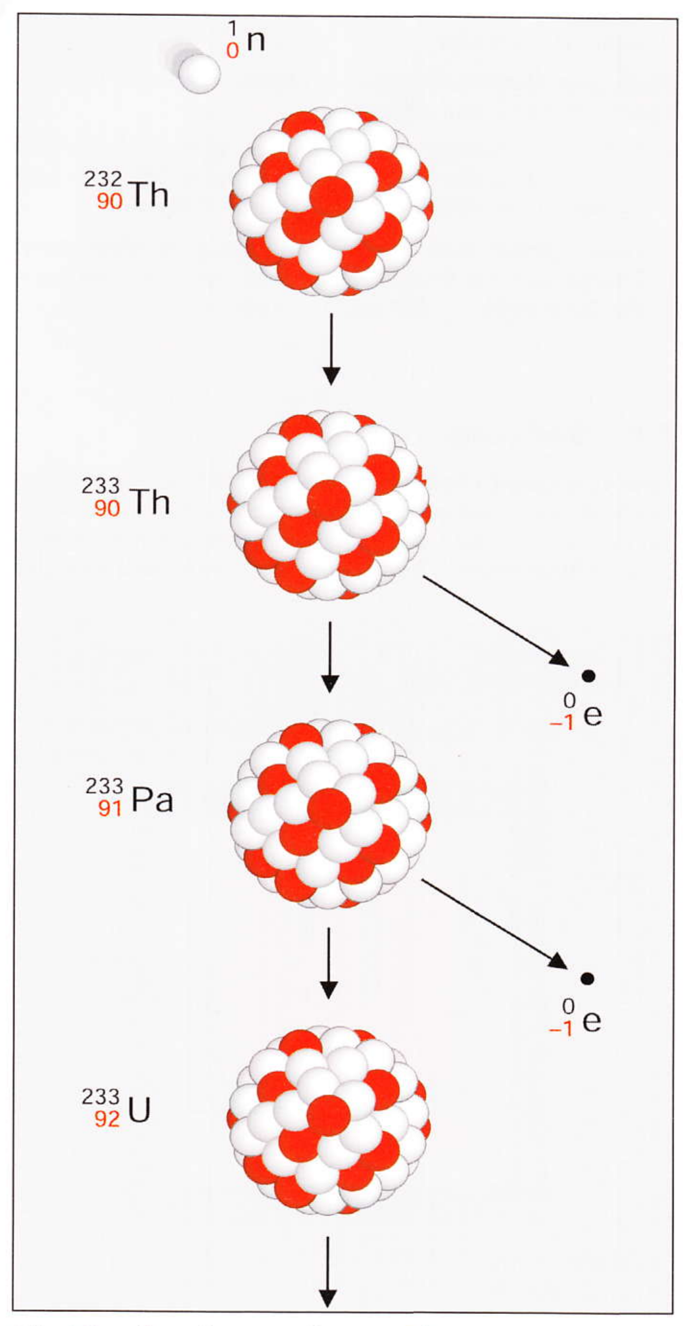


Abb. 4.6: Entstehung von U-233 aus Th-232

5 Kontrollierte Kernspaltung

5.1 Aufbau eines Kernreaktors

Anlagen, bei denen Kettenreaktionen kontrolliert ablaufen, bezeichnet man als Kernreaktoren oder kurz als Reaktoren. Sie bestehen im Prinzip aus fünf Komponenten (Abb. 5.1):

- Ausreichende Masse an spaltbarem Material,
- Stoff zur Abbremsung der Neutronen (Moderator), Ausnahme: Schneller Brutreaktor,
- Vorrichtungen zum Einfang von Neutronen (Steuer- bzw. Regelstäbe),
- Medium zur Wärmeabführung,
- Barrieren für den Strahlenschutz und die Rückhaltung radioaktiver Stoffe.

Nach dem Verwendungszweck können folgende Reaktortypen unterschieden werden:

- Forschungsreaktoren dienen der wissenschaftlichen Forschung sowie für Unterrichtszwecke. Dabei ist häufig nur die Neutronenstrahlung von Interesse.
- Leistungsreaktoren werden zur Erzeugung elektrischer Energie und als Brutreaktoren zusätzlich zur Erzeugung des Spaltstoffs Pu-239 aus U-238 verwendet.

Abb. 5.2: Energieverteilung der Neutronen, die bei der Spaltung von U-235 durch thermische Neutronen entstehen

5.2 Spaltneutronen

Eine kontrollierte Kettenreaktion lässt sich nur entwickeln, wenn eine ausreichende Anzahl von Neutronen zur Verfügung steht. Bei der Spaltung eines Kerns U-235 entstehen zwei mittelschwere Trümmerkerne sowie zwei bis drei Neutronen. Diese Spaltneutronen haben unterschiedliche Energien (Geschwindigkeiten). Am häufigsten tritt der Wert von 0,7 MeV auf, im Mittel liegt ihre Energie bei etwa 1,5 MeV (Abb. 5.2).

Abb. 5.1: Prinzip eines Kernreaktors

Zur Charakterisierung der Neutronen nach ihrer Energie bzw. ihrer Geschwindigkeit wird die Einteilung nach Tab. 5-1 verwendet. Die angegebenen Energiebeträge stellen Richtwerte dar, die Übergänge sind fließend. Die bei der Spaltung von U-235-Kernen auftretenden Neutronen gehören also praktisch ausschließlich zu den schnellen Neutronen ($E > 0{,}1$ MeV).

In einem Reaktor kann mit den Spaltneutronen grundsätzlich Folgendes geschehen:

Bezeichnung	Energie
langsame (thermische) Neutronen	< 10 eV
mittelschnelle (epithermische oder intermediäre) Neutronen	10 eV bis 0,1 MeV
schnelle Neutronen	> 0,1 MeV

Tab. 5-1: Einteilung der Neutronen nach ihrer kinetischen Energie

- Sie verlassen die Spaltzone und gehen dadurch für weitere Spaltungen verloren.
- Sie werden von U-238, von den für die Reaktorfunktionen notwendigen Materialien oder von stets vorhandenen Verunreinigungen aufgenommen, wodurch künstliche Isotope entstehen.

Der Sauerstoff-16, der im Kühlmittel eines Siedewasserreaktors enthalten ist, wandelt sich z. T. durch Neutroneneinfang in Stickstoff-16 um (Abb. 5.3). Er ist radioaktiv ($T_{1/2} = 7{,}13$ s).

$$^{16}_{8}\mathrm{O} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{16}_{7}\mathrm{N} + ^{1}_{1}\mathrm{p}$$

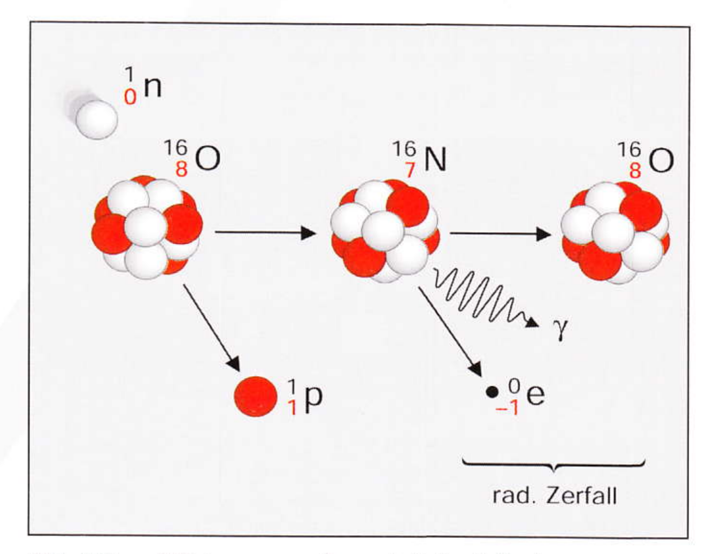


Abb. 5.3: Aktivierung von Sauerstoff durch Neutronen im Modell

Stickstoff-16 zerfällt unter Aussendung eines Betateilchens zu Sauerstoff-16. Gleichzeitig werden sehr energiereiche Gammaquanten abgegeben.

$$^{16}_{7}\mathrm{N} \rightarrow ^{16}_{8}\mathrm{O} + ^{0}_{-1}\mathrm{e} + \gamma_1 + \gamma_2$$

$T_{1/2} =$ 7,13 s; γ_1: 6,129 MeV; γ_2: 7,115 MeV

Die Wahrscheinlichkeit für einen Neutroneneinfang ist von der Bewegungsenergie der Neutronen abhängig. Die Wahrscheinlichkeit ist meist desto größer, je langsamer die Neutronen sind. Das Neutron kann dann längere Zeit in Kernnähe verweilen, wodurch die Wahrscheinlichkeit für eine Einfangreaktion größer wird. Daneben gibt es noch den sog. Resonanzeinfang, bei dem Neutronen ganz bestimmter Energie bevorzugt eingefangen werden:

- Es finden elastische oder unelastische Zusammenstöße mit Atomkernen statt, wodurch die Neutronen Energie verlieren. Ihre Geschwindigkeit wird dadurch verringert. Elastische Zusammenstöße finden im Energiebereich 10 keV bis 1 MeV statt. Die Summe der Bewegungsenergien der Stoßpartner vor und nach dem Stoß ist dann gleich (Abb. 5.4). Zu unelastischen Zusammenstößen kommt es vorwiegend im Energiebereich zwischen 1 MeV und 10 MeV. Dabei ist die Summe der Bewegungsenergien vor und nach dem Stoß nicht gleich. Das Neutron hat den Atomkern angeregt, der die Anregungsenergie in Form eines Gammaquants wieder abgibt (Abb 5.5).

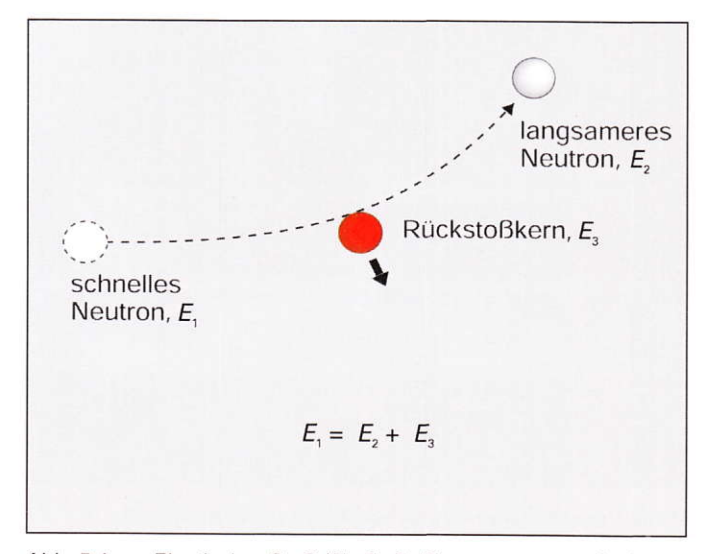


Abb. 5.4: Elastischer Stoß (E_1, E_2, E_3: Bewegungsenergien)

- Neutronen werden von Kernen des U-235 aufgenommen und lösen dadurch weitere Kernspaltungen aus. Wenn in einem Reaktor eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion abläuft, sagt man, der Reaktor ist kritisch. Was dann im einzelnen mit einer Neutronengeneration geschieht, lässt sich in vereinfachter Form zahlenmäßig angeben. Dabei wird hier von 2,3 Neutronen pro Spaltung ausgegangen (Tab. 5-2).

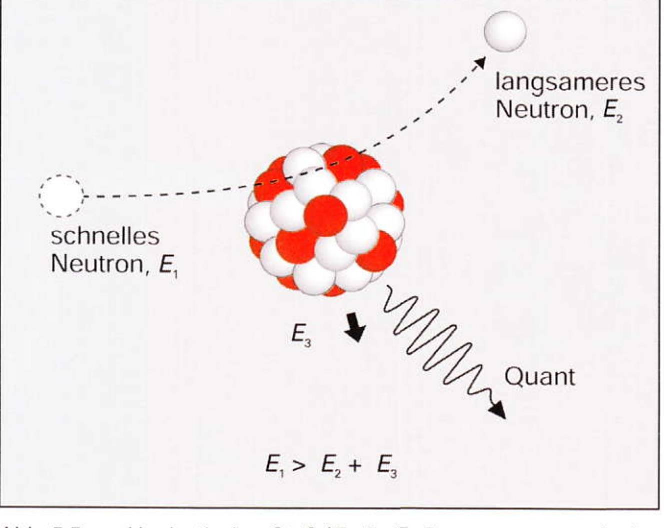
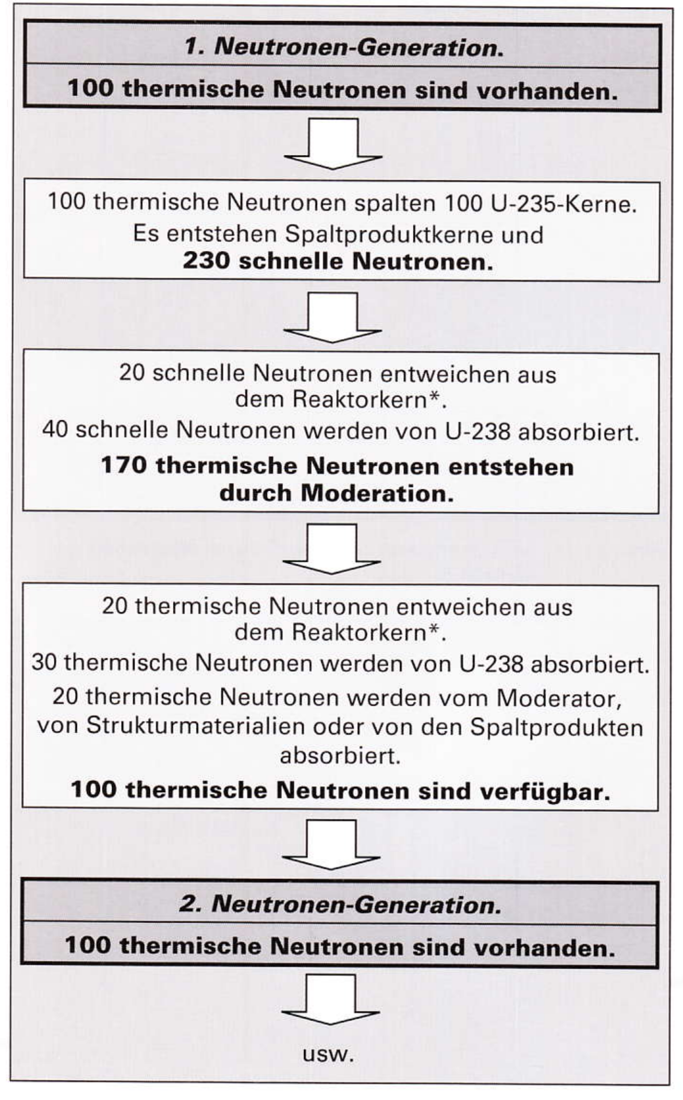


Abb. 5.5: Unelastischer Stoß (E_1, E_2, E_3: Bewegungsenergien)



1. Neutronen-Generation.

100 thermische Neutronen sind vorhanden.

100 thermische Neutronen spalten 100 U-235-Kerne.
Es entstehen Spaltproduktkerne und
230 schnelle Neutronen.

20 schnelle Neutronen entweichen aus dem Reaktorkern*.
40 schnelle Neutronen werden von U-238 absorbiert.
170 thermische Neutronen entstehen durch Moderation.

20 thermische Neutronen entweichen aus dem Reaktorkern*.
30 thermische Neutronen werden von U-238 absorbiert.
20 thermische Neutronen werden vom Moderator, von Strukturmaterialien oder von den Spaltprodukten absorbiert.
100 thermische Neutronen sind verfügbar.

2. Neutronen-Generation.

100 thermische Neutronen sind vorhanden.

usw.

* Neutronenabschirmungen um das Reaktordruckgefäß verhindern, dass Neutronen nach außen austreten

Tab. 5-2: Neutronen in einem kritischen Reaktor

5.3 Moderator

Neutronen, die bei der Spaltung von Kernen des U-235 freigesetzt werden, haben eine relativ hohe Geschwindigkeit. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie weitere Kernspaltungen hervorrufen, sehr gering. Wenn dennoch mit den schnellen Neutronen eine Kettenreaktion in Gang gehalten werden soll, muss man eine hohe U-235-Konzentration wählen und eine aufwendige Reaktortechnik anwenden. Man beschreitet diesen Weg deshalb nur, wenn nicht nur U-235-Kerne gespalten, sondern aus nicht spaltbarem Material mit Hilfe von schnellen Neutronen neuer Spaltstoff erzeugt werden soll.

Langsame Neutronen führen mit sehr viel größerer Wahrscheinlichkeit im U-235 zu Spaltungen. Die bei jeder Kernspaltung entstehenden schnellen Neutronen müssen deshalb durch geeignete Substanzen auf niedrige Geschwindigkeiten abgebremst werden. Das geschieht mit Hilfe so genannter Moderatoren (Bremsmittel). Die Neutronen werden an den Kernen des Moderators durch Stöße abgebremst (Abb. 5.6). Beim Einsatz eines Moderators kommt man mit niedrigen Spaltstoffkonzentrationen aus. Im Prinzip reicht dann der im natürlichen Uran vorhandene Anteil von etwa 0,7 % U-235.

Gute Moderatoren müssen zwei Bedingungen erfüllen:

- Die schnellen Neutronen sollen möglichst schnell durch wenige Stöße ihre Energie verlieren und dadurch abgebremst werden. Dadurch kommen sie in großer Zahl über den Geschwindigkeitsbereich hinweg, bei dem sie verstärkt von U-238 absorbiert werden. Diese Bedingung ist dann erfüllt, wenn die Masse der Atomkerne des Moderators etwa so groß ist wie die Masse des Neutrons. Tab. 5-3 zeigt, wie viele Zusammenstöße zwischen Neutronen und Atomkernen im Mittel notwendig sind, um schnelle Neutronen (E = 1,75 MeV) auf langsame Geschwindigkeiten (E = 0,025 eV) abzubremsen.
- Der Moderator darf nur eine geringe Neigung zum Einfang von Neutronen besitzen, denn vom Moderator

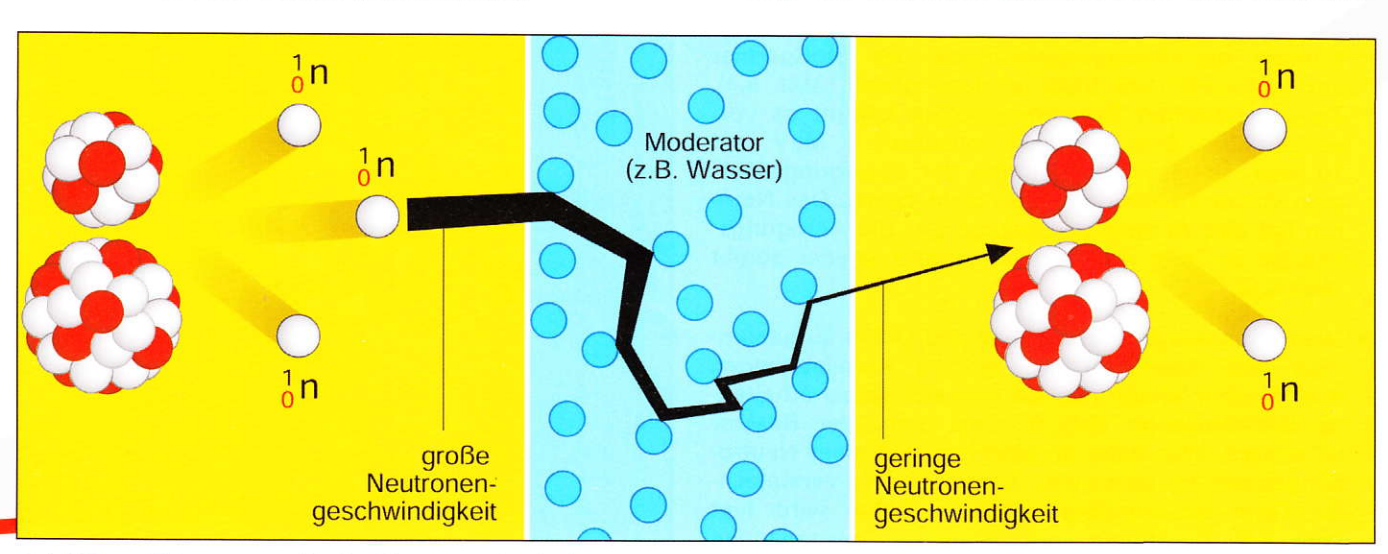


Abb. 5.6: Abbremsung schneller Neutronen durch einen Moderator im Modell

Moderator	mittlere Stoßzahl für eine Abbremsung von 1,75 MeV auf 0,025 eV	Neigung zum Einfang thermischer Neutronen in relativen Einheiten
Wasserstoff H-1	18	650
Deuterium H-2	25	1
Beryllium Be-9	86	7
Kohlenstoff C-12	114	10
Uran U-238	2 172	5 601

Tab. 5-3: Eigenschaften verschiedener Moderatorstoffe, Uran zum Vergleich

absorbierte Neutronen gehen für weitere Kernspaltungen verloren. In Tab. 5-3 ist die Neigung zum Einfang thermischer Neutronen in relativen Einheiten angegeben worden. Für Deuterium wurde der Wert 1 festgelegt. Beryllium hat dann eine siebenmal so große Neigung, Wasserstoff eine 650mal so große Neigung, Neutronen in die Atomkerne aufzunehmen. Deuterium in Form von Schwerem Wasser (D_2O) ist der beste Moderator, seine Herstellung ist jedoch sehr teuer. (Natürliches Wasser enthält ein H-2-Atom auf 6 500 H_2O-Moleküle.) Als Moderator wird vielfach auch Graphit (reiner Kohlenstoff) eingesetzt, da es gute mechanische und thermische Eigenschaften besitzt. Für eine Verwendung im Reaktor muss es jedoch absolut rein sein. Wasserstoff in Form von Leichtem Wasser (H_2O) ist zwar das beste Bremsmittel. Es hat jedoch eine sehr große Neigung zum Einfang von Neutronen. Dabei entsteht Deuterium:

$$^{1}_{1}H + ^{1}_{0}n = ^{2}_{1}H + \gamma$$

Die absorbierten Neutronen gehen für weitere Kernspaltungen verloren. Da Wasser aber sehr preiswert ist und zusätzlich günstige Eigenschaften besitzt (die Sicherheit des Reaktors betreffend), wird es in der Bundesrepublik Deutschland ausschließlich als Moderator verwendet. Außerdem kann Leichtes Wasser gleichzeitig als Kühlmittel verwendet werden. Bei Verwendung von Wasser als Moderator muss der Neutronenverlust ausgeglichen werden. Dazu erhöht man den Anteil von U-235 von 0,7 % auf 2 bis 4 %. Man erhält dann mehr Spaltungen sowie mehr Neutronen. Uran mit einem über 0,7 % liegenden Anteil von U-235 nennt man angereichertes Uran.

5.4 Temperaturabhängigkeit des Moderatoreffekts

Die Temperatur in den Brennstäben eines Reaktors schwankt in Abhängigkeit von der verlangten Reaktorleistung. Sie liegt bei Volllast im Innern der Brennstäbe bei etwa 800 °C. Die Temperatur hat Einfluss auf die Wirksamkeit des Moderators. Ein Vergleich zwischen den Moderatoren Graphit und Wasser macht das deutlich.

Bei dem Reaktor vom Typ Tschernobyl sind der Moderator (Graphit) und das Kühlmittel (Wasser) unterschiedliche Stoffe. Wenn die Anzahl der Kettenreaktionen und damit die Leistung ansteigen, entstehen im Kühlmittel Wasser mehr Dampfblasen.

Da Wasserdampf pro Volumen weniger Moleküle enthält als Wasser, werden weniger Neutronen absorbiert. Am Moderator Graphit kann nun eine höhere Anzahl von Neutronen abgebremst werden, so dass auch die Anzahl der Kernspaltungen steigt.

Durch eine erhöhte Anzahl von Kernspaltungen steigt dann aber auch die Leistung an, die zu noch mehr Dampfblasen führt usw. Man sagt, der Dampfblasenkoeffizient des Moderators ist positiv. Nur durch geeignete Sicherheitseinrichtungen wird verhindert, dass der Leistungsanstieg außer Kontrolle gerät.

In den Leichtwasserreaktoren (speziell Siedewasserreaktoren) ist das Wasser Kühlmittel und Moderator. Steigen die Anzahl der Kernspaltungen und damit auch die Leistung an, erhöht sich auch hier der Dampfblasenanteil. Da das Wasser aber gleichzeitig Moderator ist, bedeuten mehr Dampfblasen eine „Verdünnung" des Moderators. Es werden jetzt zwar weniger Neutronen absorbiert, noch weniger aber abgebremst (Moderatoreffekt ist von größerem Gewicht als der Absorptionseffekt) (Abb. 5.7). Dadurch sinkt die Anzahl der Kernspaltungen von selbst. Der Dampfblasenkoeffizient ist hier also negativ. Bei dieser Art

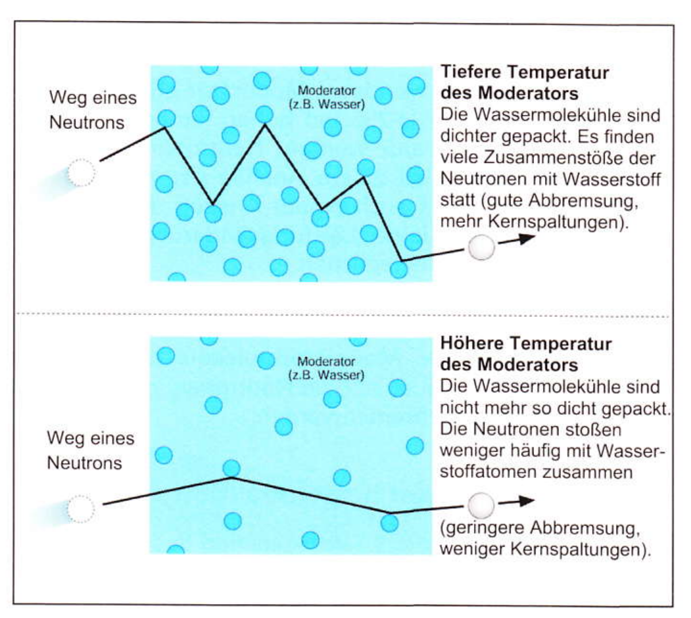


Abb. 5.7: Bei Wasser ist die Moderation von der Temperatur abhängig

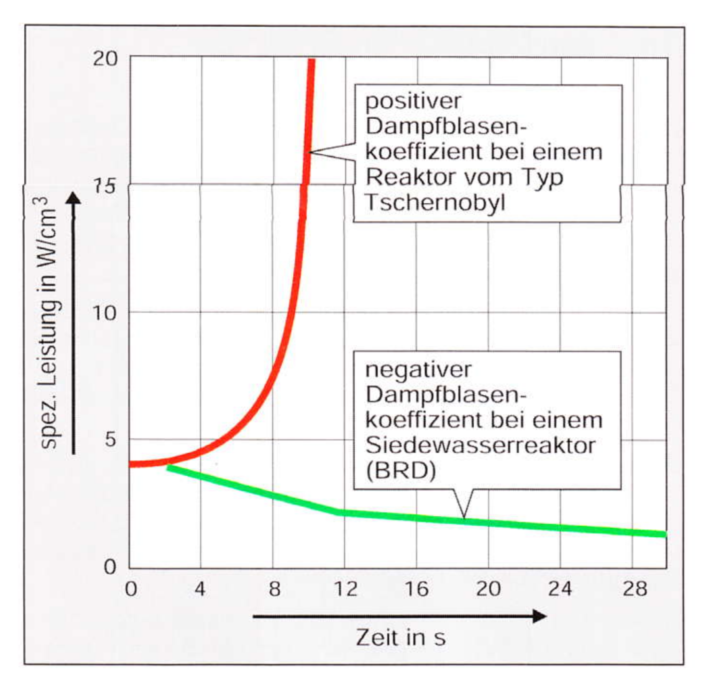


Abb. 5.8: Leistungsentwicklung bei Reaktoren mit positivem bzw. negativem Dampfblasenkoeffizient (angenommenes Szenario: Ausdrehen der Hauptkühlmittelpumpen)

von Selbststabilisierung spricht man deshalb von inhärenter (innewohnender) Stabilität.

Abb. 5.8 gibt für einen graphitmoderierten und einen leichtwassermoderierten Reaktor an, welche Wärmeleistung sich ergeben würde, wenn die Hauptkühlmittelpumpen nach dem Abschalten ausliefen (Rotation klingt ab) und die Wärme von den Brennstäben nicht mehr abgeführt würde.

Der negative Dampfblasenkoeffizient bei Leichtwasserreaktoren war in den 50er Jahren ausschlaggebend für die Wahl dieses Reaktortyps für die Bundesrepublik Deutschland.

Unabhängig vom verwendeten Moderator gilt für alle Reaktortypen, dass das U-238 bei hoher Temperatur mehr, bei niedriger Temperatur weniger Neutronen absorbiert. Dieser Effekt wirkt also einem Anstieg der Anzahl freier Neutronen und damit auch einem Anstieg der Kernspaltungen entgegen. Kleine Leistungsänderungen werden dadurch selbsttätig ausgeglichen.

Zum anderen bedeutet grundsätzlich eine Erhöhung der Moderatortemperatur, dass die Bewegungsenergie der Moderatoratome bzw. Moderatormoleküle zunimmt. Sie überträgt sich dann auch auf die Neutronen, die nun nicht mehr so schnell abgebremst werden.

5.5 Steuerung der Kettenreaktion

In einem Reaktor wird die Kettenreaktion dadurch gesteuert, dass man von außen in den Neutronenhaushalt eingreift. Das geschieht mit Hilfe von Stoffen, die eine große Neigung zur Absorption von Neutronen besitzen (z. B. Bor, Indium, Silber, Cadmium). Werden diese Steuerstäbe tief in die Spaltzone geschoben, absorbieren sie viele Neutronen. Zieht man sie wieder heraus, ist die Neutronenabsorption entsprechend geringer.

So kann z. B. eine 6,5 mm starke Schicht aus Boral (Legierung aus Aluminium und Borcarbid/B_4C) die Anzahl freier Neutronen um den Faktor 10^{10} verringern. Der Einfang von Neutronen durch Bor oder Cadmium geschieht durch eine Kernreaktion, bei der eine Sekundärstrahlung ausgesandt wird (Abb. 5.9).

$$^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{0}_{1}\mathrm{n} \rightarrow ^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{4}_{2}\mathrm{He} + \gamma$$

$$^{113}_{48}\mathrm{Cd} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{114}_{48}\mathrm{Cd} + \gamma$$

Das entstehende Lithium gelangt zum Teil in das Kühlmittel des Reaktors und wird – zusammen mit anderen Verunreinigungen – durch die Kühlmittelreinigungsanlage fortlaufend entfernt. Die Alphateilchen wandeln sich durch Aufnahme von Elektronen in Helium um, das in den Röhrchen der Steuerstäbe einen beachtlichen Gasdruck erzeugt. Die Abnahme der Borkonzentration und der Druckaufbau begrenzen die Lebensdauer der Steuerstäbe. Der Austauschrhythmus beträgt etwa sechs Jahre.

Der Zustand eines Reaktors kann durch den Multiplikationsfaktor k beschrieben werden. Er gibt das Verhältnis der Anzahl der Spaltungen einer Neutronengeneration zur Anzahl der Spaltungen der vorhergehenden Neutronengenerationen an:

$$k = \frac{\text{Zahl der Spaltungen einer Neutronengeneration}}{\text{Zahl der Spaltungen der vorhergehenden Neutronengeneration}}$$

Beispiel für ein sehr kleines Volumen der Spaltzone:

1. Neutronengeneration: 3 750 Spaltungen
2. Neutronengeneration: 3 773 Spaltungen

$$k = \frac{3\,773}{3\,750} \approx 1{,}006$$

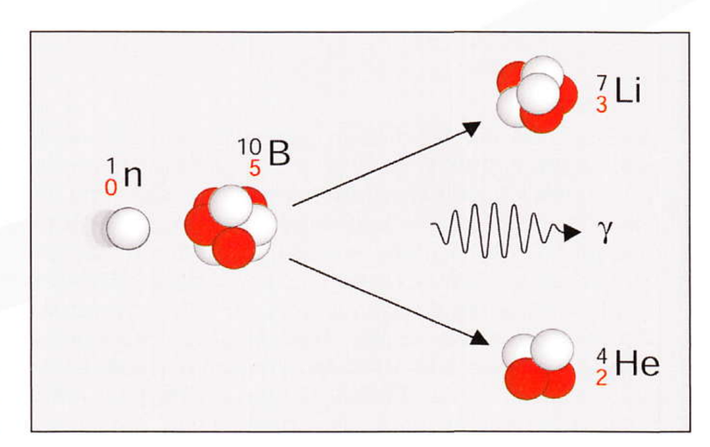


Abb. 5.9: Kernreaktion beim Neutroneneinfang mittels Bor in den Steuerstäben eines Reaktors

Beim so genannten Anfahren eines Reaktors muss der Multiplikationsfaktor größer als 1 sein ($k > 1$, überkritischer Reaktor), damit die Anzahl der Kettenreaktionen ansteigt. Ist ein bestimmtes Leistungsniveau erreicht, wird dafür gesorgt, dass $k = 1$ gilt (kritischer Reaktor).

Bei der Leistungsverringerung oder dem Abschalten eines Reaktors werden die Steuerstäbe zur Absorption der Neutronen zwischen die Brennstäbe eingefahren.

Die Kettenreaktion nimmt ab bzw. hört ganz auf ($k < 1$, unterkritischer Reaktor) (Abb. 5.10).

Bei starken Abweichungen vom normalen Reaktorbetrieb oder bei Störfällen kann der Reaktor durch schnelles Einfahren der Absorberstäbe innerhalb weniger Sekunden abgeschaltet werden.

Dieser „Schnellschuss" wird automatisch ausgelöst, kann aber auch durch Betätigen eines Notschalters herbeigeführt werden.

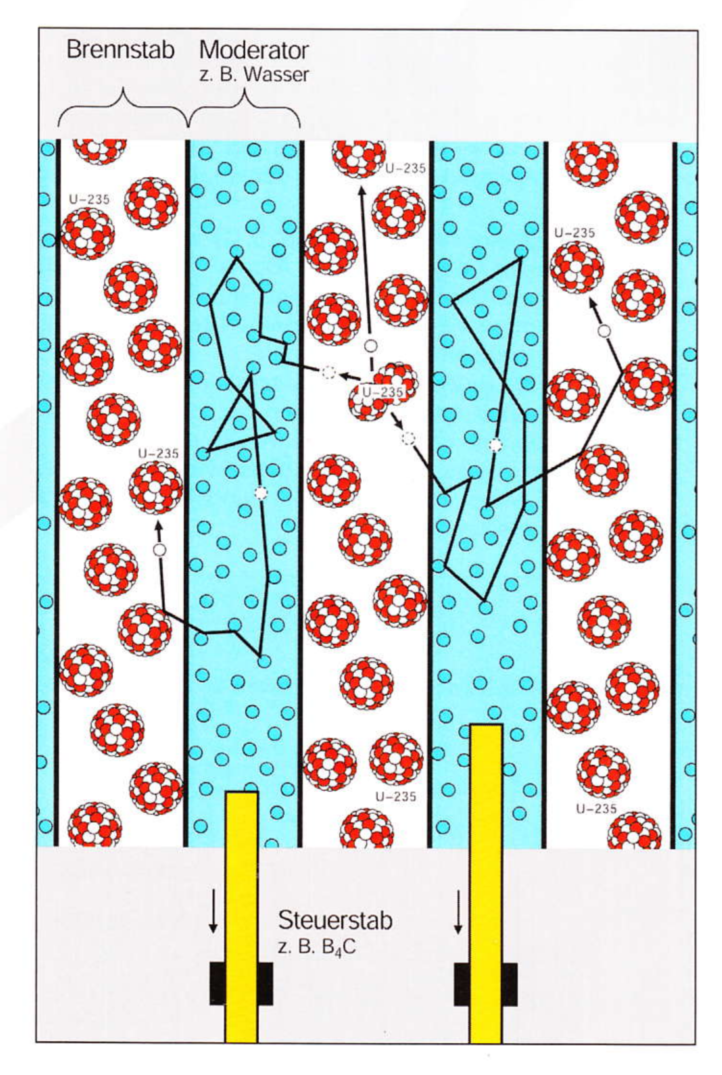
Bei einer Kettenreaktion tritt die Neutronenvermehrung in Bruchteilen von Sekunden auf. Bei der Inbetriebnahme eines Reaktors oder der Steigerung seiner Leistung wäre eine Steuerung mit mechanischen Vorrichtungen nicht möglich, weil sie viel zu langsam wären.

Der Ablauf des Spaltungsvorganges selbst kommt den Menschen aber zu Hilfe. Etwa 0,75 % der bei der Spaltung frei werdenden Neutronen werden erst mit einer Verzögerung von durchschnittlich 10 bis 20 s durch die Spaltprodukte abgegeben.

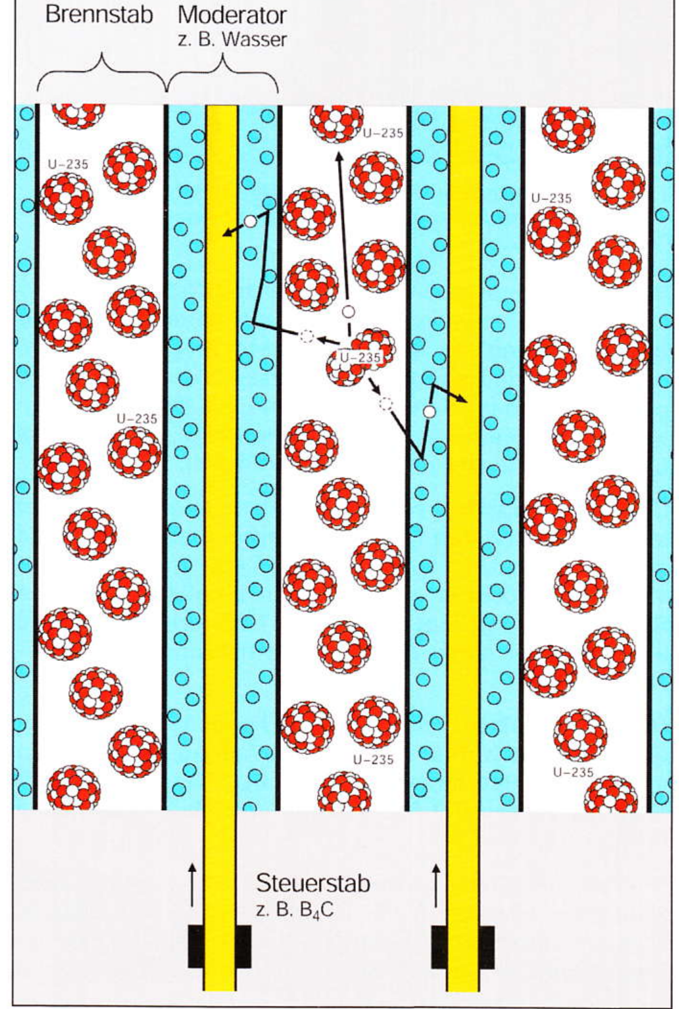
$$^{87}_{35}\text{Br} \rightarrow {}^{87}_{36}\text{Kr} + {}^{0}_{-1}\text{e}$$

$$^{87}_{36}\text{Kr} \rightarrow {}^{86}_{36}\text{Kr} + {}^{0}_{1}\text{n}$$

Stellt man bei einer Leistungserhöhung den Reaktor so ein, dass sich die Neutronen von Generation zu Generation nicht mehr als um 0,75 % vermehren, wird der Zuwachs nur durch diese verzögerten Neutronen bewirkt. Die Zeit von 20 s reicht aus, um neutronenabsorbierende Steuerstäbe zwischen die Uran-Brennstäbe zu schieben.



a) Anfahren eines Reaktors ($k > 1$)



b) Abschalten des Reaktors ($k < 1$)

Abb. 5.10: Stellung der Steuerstäbe beim Anfahren und beim Abschalten eines Reaktors

5.6 Homogener und heterogener Reaktor

Uran und Moderator lassen sich entweder miteinander mischen (homogener Reaktor) oder räumlich getrennt voneinander anordnen (heterogener Reaktor).

Bei einer homogenen Mischung beider Stoffe gibt es ein optimales Verhältnis, bei dem der Moderator seine maximale Wirkung hat. Der Multiplikationsfaktor (Neutronenvermehrungsfaktor) *k* ist dann am größten. Tab. 5-4 gibt für optimale homogene Mischungen von Natururan und Moderator den maximal erreichbaren Wert für *k* an.

Moderator	Maximaler Multiplikationsfaktor
Wasser (H_2O)	0,62
Beryllium (Be)	0,66
Graphit (C)	0,84
Schweres Wasser (D_2O)	1,33

Tab. 5-4: Maximaler Multiplikationsfaktor für Natururan und verschiedene Moderatoren (homogene Mischung)

Bei einem homogenen Reaktor, der mit Natururan (0,7 % U-235) betrieben wird, ist also eine Kettenreaktion nur bei Verwendung von Schwerem Wasser möglich. Nur dann kann der Multiplikationsfaktor $k > 1$ sein. Das ist der Grund, weshalb heute in Uranerzlagerstätten mit Hilfe von Regenwasser keine Kettenreaktion entstehen kann. Das wäre erst bei einem höheren Anteil an U-235 möglich.

Die bei Kernspaltungen entstehenden Neutronen werden in einem geringeren Maße von Kernen des U-238 eingefangen, wenn Uran und Moderator getrennt angeordnet sind, der Moderator also das Uran umgibt (heterogener Reaktor). Dann gelingt es auch, mit Natururan und Graphit als Moderator einen Neutronenvermehrungsfaktor $k > 1$ zu erreichen.

Der erste Reaktor, der von Enrico Fermi 1942 in Chicago (USA) gebaut wurde, hatte diesen Aufbau. Dazu wurden etwa 30 t Natururan benötigt. Bei Verwendung von Schwerem Wasser hätten bereits 3 t Natururan ausgereicht.

Die Neutronenbilanz lässt sich durch Verwendung eines Neutronenreflektors (z. B. Graphit, Beryllium, Schweres Wasser) verbessern. Dadurch wird ein Teil der aus der Oberfläche der Brennstäbe austretenden Neutronen in das Uran zurückgeworfen.

Bei einem Kernreaktor setzt die Kettenreaktion nur ein, wenn eine Mindestmenge an U-235 (oder Pu-239) vorhanden ist. Da während des Reaktorbetriebes der Anteil an U-235 ständig geringer wird und der größer werdende Anteil an Spaltprodukten immer mehr Neutronen absorbiert, muss der Reaktor mit einem Überschuss an spaltbarem U-235 betrieben werden. Dieser Überschuss darf jedoch nicht zu groß sein, weil sonst die Reaktorsteuerung sehr schwierig wird.

Nach etwa einem Jahr sind die zusätzlichen Reserven an U-235 aufgebraucht. Das U-235 ist dann zwar noch nicht vollständig gespalten, im Reaktor kann aber keine Kettenreaktion mehr herbeigeführt werden. Der Reaktor wird deshalb abgeschaltet und nach einer Abkühlzeit geöffnet, um neue Brennelemente einzusetzen bzw. die bereits benutzten in andere Positionen umzusetzen.

5.7 Verfahren zur Anreicherung von U-235

Im natürlichen Uran befinden sich etwa 99,3 % U-238 und etwa 0,7 % U-235. Dieses Natururan ist für Leichtwasserreaktoren nicht geeignet. Es wird Uran mit einem Gehalt an U-235 von 2 bis 4 % benötigt.

Die Anreicherung geschieht in Urananreicherungsanlagen. Für alle Anreicherungsverfahren muss das Uran in Form von Uranhexafluorid (UF_6) vorliegen. Diese chemische Verbindung verdampft bereits bei 56 °C, so dass also in den Anlagen Gasanteile voneinander getrennt werden:

- Beim Gasdiffusionsverfahren (Abb. 5.11) wird die Tatsache ausgenutzt, dass leichtere Atome oder Moleküle schneller durch eine poröse Wand (Porendurchmesser etwa 10^{-5} mm) wandern als schwerere. Die Anreicherung bei einer Trennstufe ist sehr gering.
  Es müssen bis zu 2 500 Stufen hintereinander geschaltet werden, um eine Anreicherung von bis zu 4 % zu erreichen. Da das Gas nach jeder Trennstufe erneut komprimiert werden muss, ist der Energieaufwand sehr hoch. Das Gasdiffusionsverfahren wird in den USA, Frankreich und Russland eingesetzt.

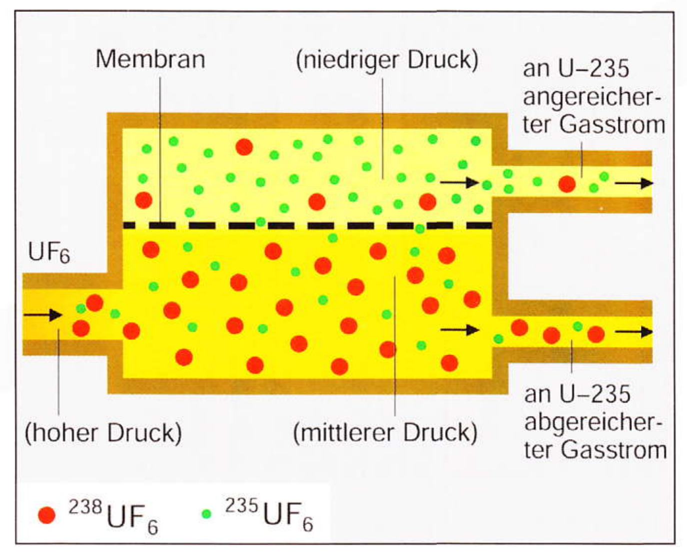


Abb. 5.11: Prinzip des Gasdiffusionsverfahrens

- Das Zentrifugen-Trennverfahren nutzt die Tatsache aus, dass die schwereren Moleküle bevorzugt an die Außenwand getrieben werden, während sich die leichteren Moleküle in der Nähe der Rotorachse aufhalten (Abb. 5.12). Die Geschwindigkeit an der Peripherie solcher Zentrifugen beträgt bis zu 500 m/s.

  Bei diesem Verfahren müssen 10 bis 30 Trennstufen hintereinander geschaltet werden, um die gewünschte Anreicherung zu erhalten. Zentrifugenanlagen existieren z. B. in den Niederlanden, Deutschland und Großbritannien. Sie benötigen deutlich weniger Energie als Gasdiffusionsanlagen.

  Da der Gasdurchsatz einer Zentrifuge sehr gering ist, müssen viele Zentrifugen parallel geschaltet werden, um eine genügend große Kapazität zur Verfügung zu haben. Insgesamt sind dann etwa 150 000 Zentrifugen im Einsatz.

- Beim Trenndüsenverfahren wird ein Gasgemisch aus UF_6 und He mit hohem Druck in eine Düse gepresst, aus der es dann mit hoher Geschwindigkeit austritt. Danach wird der Gasstrom um 180° umgelenkt (Abb. 5.13). Da die schwereren Moleküle eine größere Trägheit besitzen als die leichteren, ist ihre Richtungsänderung geringer. An U-235 angereichertes und abgereichertes UF_6 lassen sich dann getrennt auffangen. Um das U-235 auf 2 bis 4 % anzureichern, muss dieser Vorgang 400 bis 500-mal wiederholt werden.

Das an U-235 angereicherte Uranhexafluorid besteht z. B. aus 3 % $^{235}UF_6$ und aus 97 % $^{238}UF_6$. Es wird anschließend in UO_2-Pulver umgewandelt, das dann zu Tabletten verarbeitet wird (UO_2-Pellets). Sie bilden den so genannten Kernbrennstoff. (Dieser Name ist eigentlich irreführend, denn in einem Reaktor findet keine Verbrennung statt. Der exaktere Ausdruck wäre Spaltstoff.)

5.8 Naturreaktor von Oklo

In Gabun (Westafrika) gibt es ergiebige Uranerzvorkommen, die seit Ende der 60er Jahre abgebaut werden. Zur Qualitätskontrolle wird ständig die Zusammensetzung des gewonnenen Erzes sowie vor allem der Anteil an Uran-235 bestimmt. Bei der Analyse einer solchen Probe aus dem Tagebau Oklo stellte der Analysentechniker im Mai 1972 fest, dass der Uran-235-Gehalt nicht wie üblich 0,7202 Atomprozent, sondern nur 0,7171 Atomprozent betrug. Das waren 0,003 Atomprozent weniger als sonst bei allen anderen Uranerzvorkommen auf der Welt festgestellt worden war. Eine Wiederholung der Analyse ergab denselben Wert, so dass ein Messfehler ausgeschlossen werden konnte.

Bei der Untersuchung weiterer Proben stellte man Abreicherungen bis herab zu 0,296 Atomprozent fest. Dabei zeigte sich, dass die Abreicherung desto größer war, je mehr Uran das Erz enthielt, d. h. je höher die Gesamt-Urankonzentration lag. Bei Urangehalten unter etwa 1 % waren dagegen die Anteile von U-238 und U-235 wie sonst üblich verteilt.

Im August 1972 wurde erstmals die Hypothese formuliert, dass in der Erzlagerstätte in Oklo ein natürlicher Reaktor in Betrieb gewesen sein könnte. Der Gehalt an U-235 wäre dann durch Kernspaltungen bzw. eine längere Zeit in Gang gehaltene Kettenreaktion verringert worden. Einen eindeutigen Beweis für die stattgefundene Kettenreaktion erhielt man durch den Nachweis der dabei entstandenen Spaltprodukte. Die Tab. 5-5 zeigt als Beispiel die Werte für das Edelgas Xenon, von dem sich noch etwa 1 % der ursprünglich entstandenen Menge im Erz befindet. Da die Erzlagerstätte sehr alt ist, sind die relativ kurzlebigen Spaltprodukte nicht mehr vorhanden, wohl aber die stabilen Endglieder ihrer Zerfallsreihen. An insgesamt 13 Stellen fand man dadurch Hinweise auf prähistorische Reaktortätigkeit.

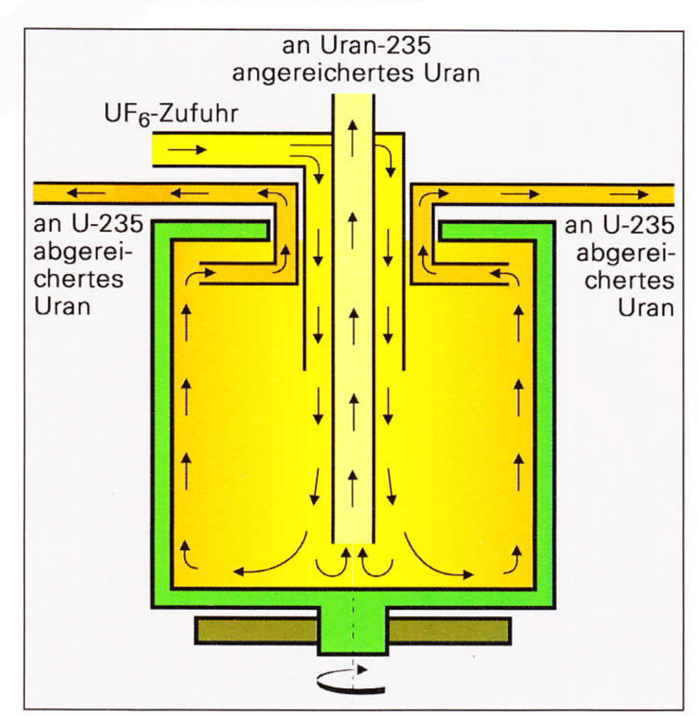


Abb. 5.12: Prinzip des Zentrifugenverfahrens

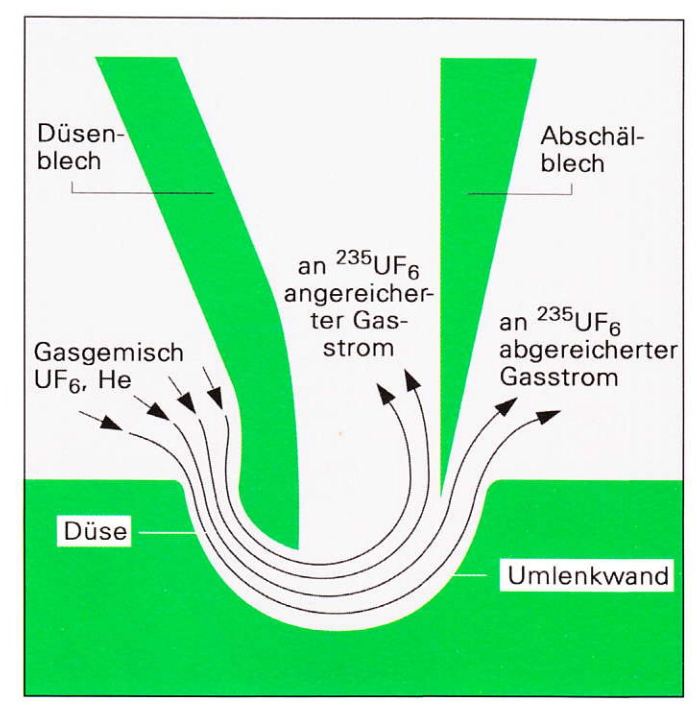


Abb. 5.13: Prinzip des Trenndüsenverfahrens

Herkunft		Massenzahl								
		124	126	128	129	130	131	132	134	136
Xe-Gehalt in Atom-prozent bei	natürl. Xe	0,10	0,09	1,9	26,4	3,3	21,2	27,0	10,5	8,9
	Spalt-Xe			0,00017	3,07	0,0015	13,08	19,45	35,45	28,95
	Oklo			0,0028	3,46	0,0346	12,38	20,35	35,38	28,48

Tab. 5-5: Isotopenzusammensetzung von Xenon aus natürlichen Vorkommen, als Spaltprodukt in Kernkraftwerken und einer Probe aus Oklo

Wie konnte es aber in der Natur zu einer kontrollierten Kettenreaktion kommen? Damit eine Kettenreaktion in Gang kommt, müssen drei Bedingungen erfüllt sein. Es müssen eine hohe Urankonzentration mit einem genügend großen Anteil an U-235 vorliegen, ein Moderator zur Abbremsung der Neutronen zur Verfügung stehen und Stoffe fehlen, die zuviel Neutronen einfangen.

Die Urankonzentration beträgt in Oklo an einigen Stellen bis über 60 Gewichtsprozent. Solche besonders uranreiche Zonen sind etwa 0,6 bis 1 m dick und wenige Meter breit (Abb. 5.14). Da die Uranerzlagerstätte etwa 1,8 Milliarden Jahre alt ist, lag zur Zeit ihres Entstehens auch der Gehalt an U-235 höher, und zwar über 3 % (U-235: $T_{1/2}$ = ca. 0,72 · 10 a). Unter diesen Bedingungen konnte dann auch Wasser ein geeigneter Moderator sein.

Die Kettenreaktion hielt sich vermutlich mehrere hunderttausend Jahre selbst in Gang. Dabei traten Temperaturen zwischen etwa 180 °C und etwa 450 °C auf. Wie es über so lange Zeit zu einer kontrollierten Kettenreaktion kommen konnte, ist noch nicht bekannt.

Man nimmt an, dass zwei unterschiedliche Kontrollmechanismen wirksam waren:

- Geringe Beimengungen von Li-6, B-10 und Cd-113 sowie die entstandenen Spaltprodukte haben gerade so viel Neutronen eingefangen, dass die Kettenreaktion nicht lawinenartig ablief.
- Das als Moderator wirkende Wasser bildete einen zweiten Regelmechanismus. Je nachdem, ob Regenwasser in das Uran eindrang oder aus ihm verdampfte, nahm die Anzahl der Kernspaltungen zu oder ab. Verdampfte Wasser aus dem Erdreich, konnten die Neutronen nicht mehr ausreichend abgebremst werden. Die Anzahl der Kernspaltungen ging zurück und die Temperatur sank. Sickerte Wasser ein, stieg die Anzahl der Kernspaltungen wieder usw.

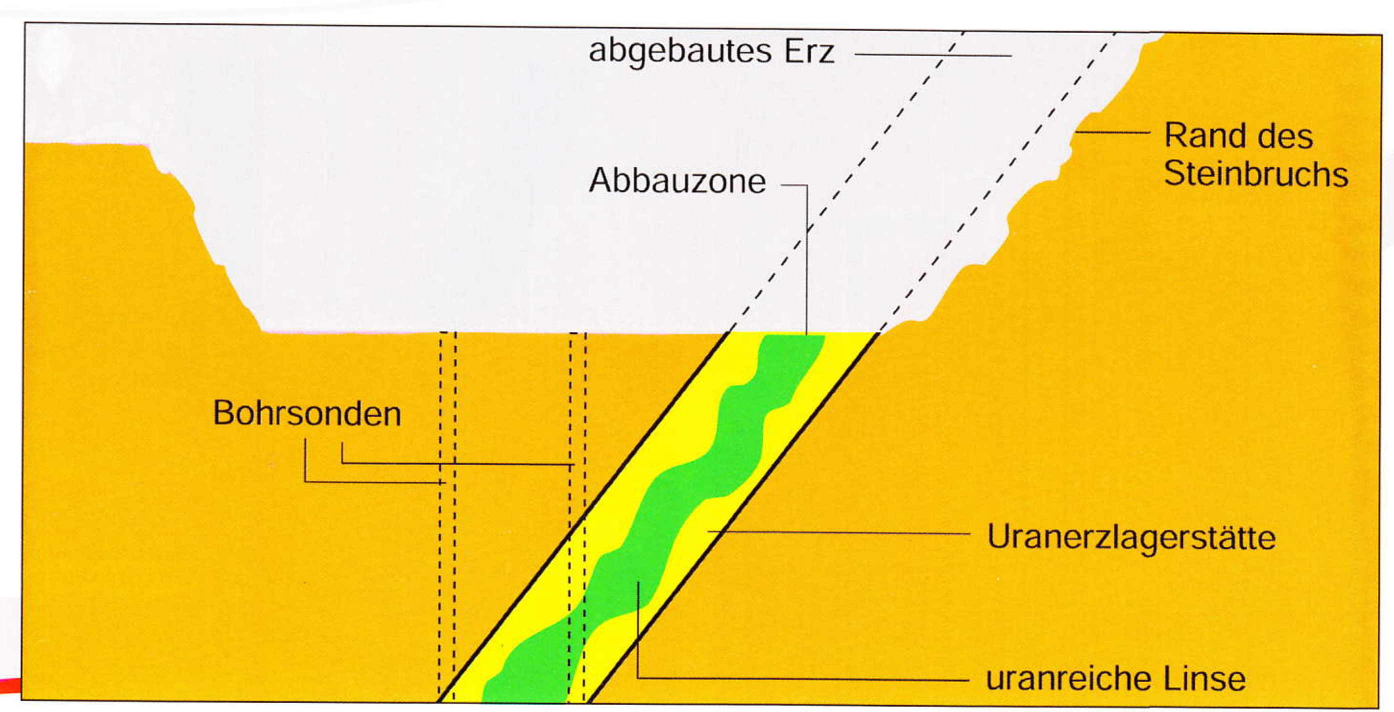


Abb. 5.14: Senkrechter Schnitt durch einen Teil der Uranerzlagerstätte Oklo

6 Kernkraftwerke

6.1 Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (Beispiel: Kernkraftwerk Krümmel)

Die Brennelemente, die das Urandioxid enthalten, befinden sich in dem zu etwa zwei Drittel mit Wasser gefüllten Druckbehälter. Das Wasser strömt von unten nach oben durch den Reaktorkern und führt die in den Brennstäben entwickelte Wärme ab. Ein Teil des Wassers verdampft. Nach einer Dampf-Wasser-Trennung im oberen Teil des Druckbehälters wird dieser Sattdampf mit einer Temperatur von 286,4 °C und einem Druck von ca. 70,6 bar direkt der Turbine zugeführt. Die Dampfmenge beträgt bis zu 7 186 t Dampf pro Stunde. Die Turbine ist mit einem Drehstromgenerator gekoppelt, der eine Leistung von 1 316 Megawatt (Wirkleistung) bei einer Spannung von 27 kV liefert. Die Frequenz beträgt 50 Hz.

Das im Druckbehälter nicht verdampfte Wasser fließt in dem Ringraum zwischen Druckbehälter und Reaktorkern wieder nach unten, wobei es sich mit dem aus dem Kondensator zurückgepumpten Speisewasser vermischt. Die im Druckbehälter vorhandenen Pumpen wälzen das Kühlmittel um. Durch eine Veränderung der Drehzahl dieser Pumpen kann die Umwälzmenge des Kühlmittels geändert und dadurch die Reaktorleistung gesteuert werden. Bei der Nennleistung des Reaktors strömen pro Stunde rund 57 200 t Kühlmittel durch seinen Kern.

Der aus der Turbine austretende Dampf wird im Kondensator verflüssigt. Dazu sind pro Stunde etwa 205 000 m^3 Kühlwasser erforderlich, die der Elbe entnommen werden. Das Speisewasser wird durch Vorwärmanlagen auf eine Temperatur von 215 °C gebracht und dem Reaktor wieder zugeführt.

Die 205 Steuerstäbe, die das neutronenabsorbierende Material (Borcarbid + Hafnium) enthalten, werden elektromotorisch (Normalantrieb) oder hydraulisch (Schnellabschaltung) von unten in den Reaktorkern eingefahren oder wieder herausgezogen.

Aus dem Sicherheitsbehälter führen die Rohrleitungen nach außen in das Maschinenhaus. Da der Dampf nicht frei von radioaktiven Verunreinigungen ist, muss auch das Maschinenhaus in eine Sicherheitsabschirmung einbezogen sein. Außerdem sind eine Reihe weiterer Sicherheitsvorrichtungen eingebaut, um bei einer Störung eine sofortige Unterbrechung des Dampfstromes zum Maschinenhaus zu erreichen.

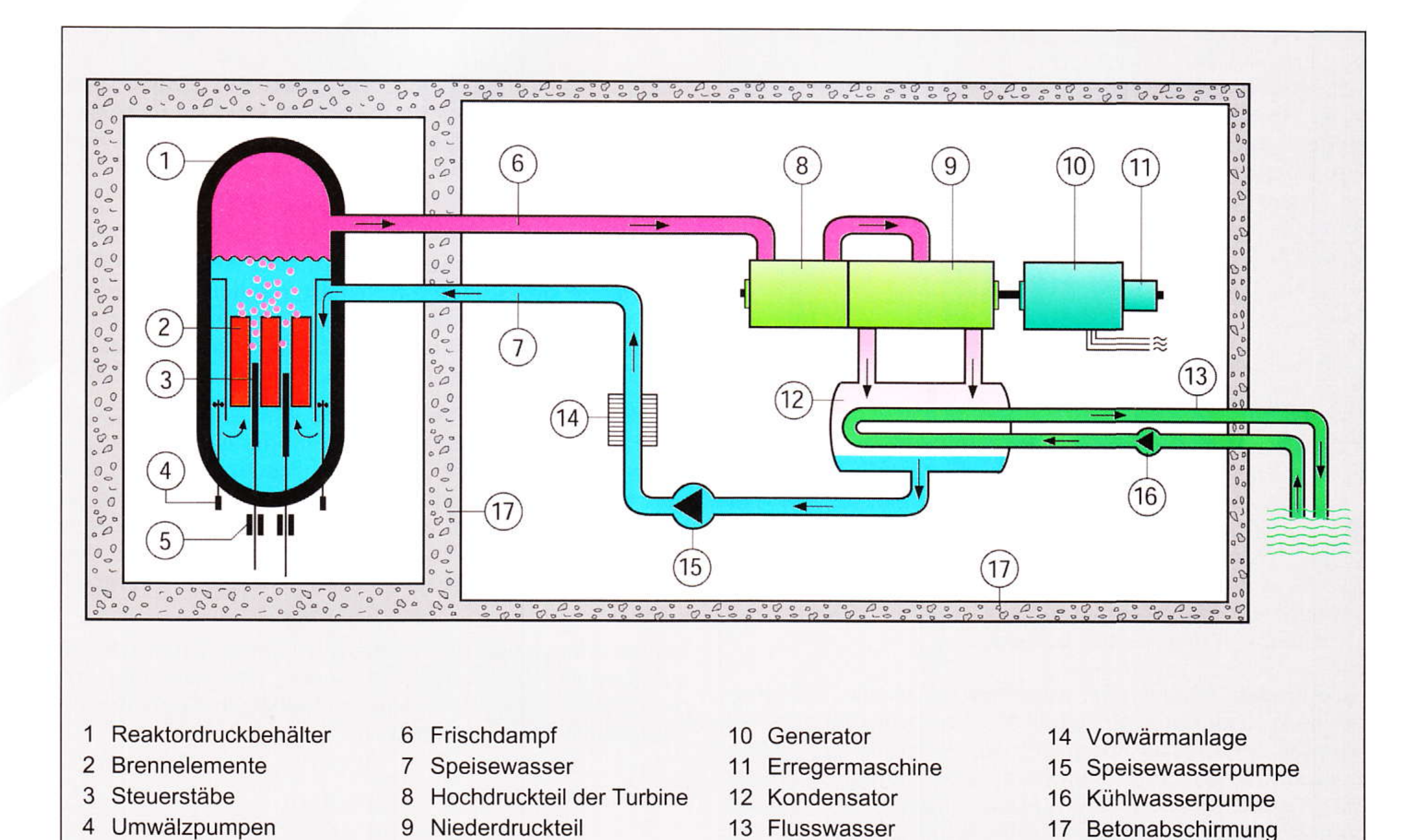


Abb. 6.1: Kernkraftwerk mit Siedewasserreaktor (vereinfachte Schemazeichnung)

Kernbrennstoff	UO_2	Kühlmittel und Moderator	H_2O, voll entsalzt
Anreicherung an U-235	bis zu 4,02 %	therm. Reaktorleistung	3 690 MW
Kernbrennstoffmenge	149 t	elektr. Bruttoleistung	1 316 MW
Anzahl der Brennelemente	840	elektr. Nettoleistung	1 260 MW
Anzahl der Brennstäbe je Brennelement	9x9QA-72	Nettowirkungsgrad	34,1 %
Brennstablänge	4,17 m	mittlere Leistungsdichte im Reaktorkern	49,6 kW/dm^3
Brennstabdurchmesser	9x9QA-11 / SVEA96-9,62 mm	Entlade-Abbrand (Gleichgewichtskern)	55 000 MWd/t U
Anzahl der Steuerstäbe	205	Wärmeübertragungsfläche im Reaktorkern	7 963 m^2
Absorbermaterial	Borcarbid + Hafnium	Kondensator-Kühlfläche	3 x 18 475 m^2

Tab. 6-1: Technische Daten zum Kernkraftwerk Krümmel

Das Reaktordruckgefäß mit den Brennelementen ist ein zylindrischer Stahlbehälter. Er ist mit einem Betonschild abgeschirmt und befindet sich zusammen mit einer Reihe weiterer Anlagenteile und Sicherheitseinrichtungen in einem kugelförmigen Sicherheitsbehälter, der in der Abbildung jedoch nicht dargestellt ist (Abb. 6.1 und Tab. 6-1).

6.2 Kernkraftwerk mit Druckwasserreaktor (Beispiel: Kernkraftwerk Brokdorf)

Durch das Wasser wird die in den Brennelementen erzeugte Wärme abgeführt. Um ein Sieden zu verhindern, wird der Betriebsdruck im Hauptkühlkreis auf 157 bar (15,7 MPa) heraufgesetzt und durch einen Druckhalter geregelt. Das Kühlmittel tritt mit einer Temperatur von 291 °C in den Reaktor ein und verlässt ihn mit einer Temperatur von 326 °C. Etwa 67 680 t Kühlmittel werden je Stunde durch den Reaktor bewegt.

Das erhitzte Wasser gibt seine Wärme in vier Dampferzeugern (davon nur einer in Abb. 6.2 dargestellt) an das Wasser eines Sekundärkreises ab. Aufgrund der hohen Temperatur und des niedrigeren Druckes verdampft es im Sekundärkreis und liefert pro Sekunde 2,1 t Sattdampf von 285 °C und einem Druck von 66 bar (6,6 MPa). Durch ein solches Zweikreissystem wird erreicht, dass die im Reaktorkühlmittel auftretenden radioaktiven Stoffe auf den ersten Kühlkreislauf beschränkt bleiben und nicht in die Turbine und den Kondensator gelangen. Mit Hilfe des erzeugten Dampfes wird eine Turbine (Hochdruckteil, Niederdruckteil) betrieben, die direkt mit einem Drehstrom-Synchrongenerator gekoppelt ist. Der Generator liefert an den Klemmen eine Leistung von 1 395 Megawatt (Wirkleistung) bei einer Spannung von 27 kV. Die Frequenz beträgt 50 Hz.

Im Kondensator wird der aus der Turbine austretende Dampf wieder verflüssigt. Dazu sind etwa 208 000 m^3 Kühlwasser pro Stunde erforderlich, die der Elbe entnommen werden. Das Kondensat wird durch eine Vorwärmanlage zugeführt, auf 218 °C vorgewärmt und anschließend in den Dampferzeuger zurückgeleitet.

Für die Steuerstäbe des Reaktors wird z. B. eine Legierung aus Silber, Indium und Cadmium als Absorbersubstanz verwendet. Für schnelle Steuervorgänge können 61 Steuerstäbe ganz oder teilweise in den Reaktor eingefahren und wieder heraus gezogen werden. Für langsame oder langfristige Regelvorgänge wird Borsäure als Neutronenabsorber dem Reaktorkühlwasser zugesetzt.

Die Brennelemente befinden sich in einem Druckbehälter aus Spezialstahl (Wandstärke 25 cm), der zusammen mit dem Primärkreislauf in einem doppelwandigen Sicherheitsbehälter untergebracht ist.

6.3 Kernkraftwerk mit Schnellem Brutreaktor

In Siede- und Druckwasserreaktoren kann von den in der Natur vorhandenen Uranisotopen nur das Uran-235